

**Medizinische Fakultät der  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg**

**Vergleich der Weil-Osteotomie und der distalen minimalinvasiven  
metatarsalen Osteotomie  
zur Behandlung einer chronischen Metatarsalgie:  
eine klinische, radiologische und pedobarografische Analyse**

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Medizin (Dr. med.)

von Isabella Kröber  
geboren am: 24.08.1995 in Dresden

Betreuerin:  
Frau apl. Prof. Dr. med. habil. Natalia Gutteck

Gutachter\*innen:  
PD Dr. med. Julia Funk, Berlin  
Prof. Dr. med. Stefan Rammelt, Dresden

04.05.2021

21.03.2022

## Referat

Die Metatarsalgie ist ein weitverbreitetes Krankheitsbild und häufig schwierig zu therapieren. Ursächlich können sowohl strukturelle als auch biomechanische Veränderungen des Vorfußes sein. Häufig tritt die chronische Metatarsalgie in Kombination mit weiteren Fehlstellungen, wie einem Hallux valgus oder Kleinzehendeformitäten auf. Sowohl die Weil-Osteotomie als auch die neuere distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie (DMMO) gelten als geeignete operative Therapieverfahren und haben sich in bisherigen Studien als vergleichbar erwiesen.

In dieser Studie wurden 77 Patienten mit chronischer Metatarsalgie untersucht, welche alle am Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie in Halle (Saale) behandelt wurden. Davon erhielten 41 Patienten (44 Füße) eine DMMO und 36 Patienten (40 Füße) eine Weil-Osteotomie. Klinische und radiologische Untersuchungen fanden sowohl präoperativ als auch zwei Wochen, sechs Wochen und zwölf Monate postoperativ statt. Dabei wurden der Hallux-valgus-Winkel, der Intermetatarsalwinkel, die Elevation des ersten Metatarsale und der Vorfußmorphotyp nach Maestro bestimmt. Die Erfassung des AOFAS-Vorfußscores und eine pedobarografische Messung erfolgten jeweils präoperativ und ein Jahr postoperativ. In beiden Gruppen zeigte sich eine deutliche Verbesserung des AOFAS-Scores. Dabei wurden nach Weil-Osteotomie postoperativ bessere Scores als nach DMMO beobachtet, was auf präoperativ höhere Ausgangswerte zurückgeführt werden konnte. Im Vergleich zur DMMO scheint die Weil-Osteotomie eine höhere Rate an Wundheilungsstörungen und Wundinfektionen aufzuweisen. Die radiologischen Ergebnisse waren in beiden Gruppen vergleichbar, wobei nur in wenigen Fällen die Schaffung eines harmonischen Vorfußes gelang. Pedobarografisch zeigte sich in beiden Gruppen eine vergleichbare Belastungszunahme des medialen Vorfußes. Im Bereich des lateralen Vorfußes zeigte sich nach Weil-Osteotomie eine Zunahme des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals, wohingegen nach DMMO eine Abnahme beobachtet wurde. Die Stellung des ersten Strahls wirkte sich dabei maßgeblich auf die Belastung des medialen Vorfußes aus. Hingegen sollte auch die Stellung der Kleinzehen Berücksichtigung finden und der Entstehung von sogenannten floating toes vorgebeugt werden, da diese mit einer deutlichen Mehrbelastung des zentralen Vorfußes assoziiert waren. Im Rahmen der Vorfußkorrektur bietet die DMMO mehr Vorteile als die Weil-Osteotomie und sollte unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Studie insbesondere bei Patienten mit Risikoprofil bevorzugt werden.

Kröber, Isabella: Vergleich der Weil-Osteotomie und der distalen minimalinvasiven metatarsalen Osteotomie zur Behandlung einer chronischen Metatarsalgie: eine klinische, radiologische und pedobarografische Analyse, Halle (Salle), Univ., Med. Fak.; Diss. 78 Seiten, 2021

# Inhaltsverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

## Tabellenverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Begriffsdefinition Metatarsalgie .....	1
1.2	Ätiologie.....	1
1.3	Vorfußmorphotypen.....	4
1.4	Symptomatik.....	5
1.5	Diagnostik .....	6
1.6	Therapiemethoden .....	6
1.6.1	Konservativ .....	6
1.6.2	Operativ .....	7
1.7	Weil-Osteotomie .....	7
1.8	Distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie .....	9
<b>2</b>	<b>Zielsetzung der Arbeit.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Material und Methodik.....</b>	<b>13</b>
3.1	Ein- und Ausschlusskriterien.....	13
3.2	Unerwünschte Ereignisse .....	13
3.3	Klinische Untersuchung und Anamnese .....	13
3.4	AOFAS-Score .....	15
3.5	FFI-Score .....	15
3.6	Radiologische Untersuchung .....	16
3.7	Pedobarografische Untersuchung .....	19
3.7.1	Messgerät .....	19
3.7.2	Durchführung der Messung.....	20
3.8	Operationstechnik .....	21
3.8.1	Weil-Osteotomie .....	21
3.8.2	Distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie.....	21
3.9	Statistische Auswertung .....	22

<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>23</b>
4.1	Allgemeine Patientendaten .....	23
4.2	Zusätzliche operative Eingriffe .....	23
4.3	Aufgetretene unerwünschte Ereignisse .....	24
4.4	AOFAS-Score .....	25
4.5	FFI-Score .....	27
4.6	Radiologische Ergebnisse.....	28
4.7	Maestro-Morphotypen.....	32
4.8	Pedobarografie .....	34
4.8.1	Spitzendruck .....	34
4.8.2	Kraft-Zeit-Integral .....	38
4.9	Einfluss der Elevation des MT-I.....	43
4.10	Korrelationen .....	48
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>52</b>
5.1	Klinisches Outcome .....	53
5.1.1	Komplikationen.....	53
5.1.2	AOFAS-Score .....	54
5.1.3	FFI-Score .....	56
5.2	Radiologisches Outcome .....	57
5.3	Pedobarografisches Outcome .....	62
5.3.1	Medialer Vorfuß .....	64
5.3.2	Zentraler Vorfuß .....	65
5.3.3	Lateraler Vorfuß.....	66
5.3.4	Einfluss der Stellung des MT-I .....	68
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>Thesen .....</b>	<b>78</b>

## **Anhang**

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Maestro Morphotypen - <b>a:</b> harmonisch, <b>b:</b> M2M3 long, <b>c:</b> M4M5 Hypoplasie, <b>d:</b> M1 long.....	5
<b>Abbildung 2:</b> schematische Darstellung einer Weil-Osteotomie.....	8
<b>Abbildung 3:</b> Patientin mit floating toe nach Hallux valgus Korrektur und Weil-Osteotomie.....	9
<b>Abbildung 4:</b> Vorfußscore nach AOFAS für die Vorfußstrahlen 2-5.....	16
<b>Abbildung 5:</b> Dorsoplantare Röntgenaufnahme des rechten Fußes mit HVA und IMA .....	17
<b>Abbildung 6:</b> Dorsoplantare Röntgenaufnahme des rechten Fußes mit M2-Achse und SM4-Linie zur Bestimmung des Metatarsalindex nach Maestro .....	18
<b>Abbildung 7:</b> Laterale Röntgenaufnahme des linken Fußes mit positiven Elevationswinkel ...	18
<b>Abbildung 8:</b> Gangbahn mit Messplatte .....	19
<b>Abbildung 9:</b> Fußabdruck mit Pedobarografiemasken .....	20
<b>Abbildung 10:</b> prä- und postoperativer AOFAS-Score .....	25
<b>Abbildung 11:</b> absolute Veränderung des AOFAS-Scores bei Weil-Osteotomie und DMMO ....	26
<b>Abbildung 12:</b> prä- und postoperativer FFI-Score bei DMMO.....	27
<b>Abbildung 13:</b> prä- und postoperativer Hallux-valgus-Winkel bei Weil-Osteotomie und DMMO .....	28
<b>Abbildung 14:</b> absolute Veränderung des Hallux-valgus-Winkels bei Weil-Osteotomie und DMMO .....	29
<b>Abbildung 15:</b> prä- und postoperativer Intermetatarsalwinkel bei Weil-Osteotomie und DMMO .....	30
<b>Abbildung 16:</b> absolute Veränderung des Intermetatarsalwinkels bei Weil-Osteotomie und DMMO.....	30
<b>Abbildung 17:</b> prä- und postoperativer Elevationswinkel bei Weil-Osteotomie und DMMO ...	31
<b>Abbildung 18:</b> prä- und postoperativer Spitzendruck bei Weil-Osteotomie.....	34
<b>Abbildung 19:</b> prä- und postoperativer Spitzendruck bei DMMO .....	35
<b>Abbildung 20:</b> absolute Veränderung des Spitzendrucks bei Weil-Osteotomie und DMMO ....	35
<b>Abbildung 21:</b> prä- und postoperatives Kraft-Zeit-Integral bei Weil-Osteotomie .....	39
<b>Abbildung 22:</b> prä- und postoperatives Kraft-Zeit-Integral bei DMMO .....	39
<b>Abbildung 23:</b> absolute Veränderung des Kraft-Zeit-Integrals bei Weil-Osteotomie und DMMO .....	40
<b>Abbildung 24:</b> prä- und postoperativer AOFAS-Score in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel.....	45
<b>Abbildung 25:</b> prä- und postoperativer FFI-Score in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel.....	45

<b>Abbildung 26:</b> prä- und postoperativer Hallux-valgus-Winkel in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel .....	46
<b>Abbildung 27:</b> prä- und postoperativer Intermetatarsalwinkel in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel .....	46
<b>Abbildung 28:</b> postoperativer Spitzendruck in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel .....	47
<b>Abbildung 29:</b> postoperatives Kraft-Zeit-Integral in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel .....	47

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Gruppendaten .....	23
<b>Tabelle 2:</b>	Anzahl der operierten Strahlen .....	23
<b>Tabelle 3:</b>	Anzahl zusätzlich durchgeführter operativer Eingriffe.....	24
<b>Tabelle 4:</b>	Anzahl aufgetretener unerwünschter Ereignisse .....	24
<b>Tabelle 5:</b>	Lineare Regression des postoperativen AOFAS-Scores in Abhängigkeit der gewählten Operationsmethode .....	27
<b>Tabelle 6:</b>	prä- und postoperative Elevationswinkel.....	32
<b>Tabelle 7:</b>	Anzahl der Morphotypen nach Maestro .....	33
<b>Tabelle 8:</b>	Lineare Regression des postoperativen Spitzendrucks (medialer Vorfuß) .....	36
<b>Tabelle 9:</b>	Lineare Regression des postoperativen Spitzendrucks (zentraler Vorfuß) .....	37
<b>Tabelle 10:</b>	Lineare Regression des postoperativen Spitzendrucks (lateral Vorfuß) .....	38
<b>Tabelle 11:</b>	Lineare Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals (medialer Vorfuß).....	41
<b>Tabelle 12:</b>	Lineare Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals (zentraler Vorfuß).....	42
<b>Tabelle 13:</b>	Lineare Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals (lateral Vorfuß).....	43
<b>Tabelle 14:</b>	Postoperative Elevationswinkel für Gruppe A und B .....	43
<b>Tabelle 15:</b>	Pearson-Korrelationskoeffizient für AOFAS-Score und FFI-Score .....	48
<b>Tabelle 16:</b>	Pearson-Korrelationskoeffizient für postoperativen AOFAS-Score, FFI-Score und postoperativen HVA, IMA, ELE .....	48
<b>Tabelle 17:</b>	Pearson-Korrelationskoeffizient für postoperativen HVA und IMA.....	49
<b>Tabelle 18:</b>	Pearson-Korrelationskoeffizient für postoperativen HVA, IMA und ELE .....	49
<b>Tabelle 19:</b>	Pearson-Korrelation postoperativer Spitzendruck und postoperativer AOFAS, FFI-Score .....	49
<b>Tabelle 20:</b>	Pearson-Korrelation postoperatives Kraft-Zeit-Integral und postoperativer AOFAS-Score bzw. FFI-Score.....	50
<b>Tabelle 21:</b>	Pearson-Korrelation postoperativer Spitzendruck mit postoperativem HVA, IMA, ELE.....	50
<b>Tabelle 22:</b>	Pearson-Korrelation postoperatives Kraft-Zeit-Integral mit postoperativem HVA, IMA, ELE.....	51
<b>Tabelle 23:</b>	Korrelation postoperativer Spitzendruck mit postoperativem Maestro- Morphotyp.....	51
<b>Tabelle 24:</b>	Korrelation postoperatives Kraft-Zeit-Integral mit postoperativem Maestro- Morphotyp.....	51

## Abkürzungsverzeichnis

AOFAS	American Orthopaedic Foot & Ankle Society
BMI	Body-Mass-Index
CVF	zentraler Vorfuß
Diff.	Differenz
DIP-Gelenk	distales Interphalangealgelenk
DMMO	distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie
ELE	Elevationswinkel
FFI	Foot Functional Index
HVA	Hallux-valgus-Winkel
IMA	Intermetatarsalwinkel
IP-Gelenk	Interphalangealgelenk
LVF	lateral Vorfuß
M1/MT-I	Metatarsale 1
M2/ MT-II	Metatarsale 2
M3/ MT-III	Metatarsale 3
M4/ MT-IV	Metatarsale 4
M5/ MT-V	Metatarsale 5
MF	Mittelfuß
MICA	minimal-invasive Chevron- und Akin-Osteotomie
MRT	Magnetresonanztomographie
MTP-Gelenk	Metatarsophalangealgelenk
MVF	medialer Vorfuß
MW	Mittelwert
PIP-Gelenk	proximales Interphalangealgelenk
SD	Standardabweichung



# 1 Einleitung

## 1.1 Begriffsdefinition Metatarsalgie

Schätzungsweise 90% aller Störungen im Bereich des Fußes betreffen den Vorfuß (DuVries 1965). Die Metatarsalgie gilt mit über 80 Prozent als die häufigste Ursache für Schmerzen im Fußbereich (Bardelli et al. 2003). Insbesondere Frauen sind von diesem Krankheitsbild betroffen (Fadel et al. 2002). Die Prävalenz der Metatarsalgie in der Gesamtbevölkerung beträgt 10%, in der älteren Bevölkerung hingegen zwischen 50% bis 95% (Fadel et al. 2002).

Der Begriff Metatarsalgie leitet sich aus den griechischen Wörtern *Metatarsus* „Mittelfuß“ und *algos* „Schmerz“ ab, bezeichnet also akute oder chronische Schmerzen unter den Köpfchen der Mittelfußknochen, welche bei Belastung auftreten. Insbesondere betrifft dies die Metatarsaleköpfchen II-IV, da hier die größte Belastung auftritt. Es handelt sich daher nicht um eine konkrete Diagnose, sondern um eine Beschreibung eines Symptoms, welches vielfältige Ursachen haben kann. Ursächlich dafür ist zumeist eine Störung der Biomechanik des Fußes (Bardelli et al. 2003), hervorgerufen durch Fehlstellungen des Vorfußes, der Großzehe, der Kleinzehen oder eine Kombination daraus, aber auch durch Gelenkveränderungen z.B. aufgrund rheumatischer Erkrankungen oder Arthrose (Schuh und Trnka 2011). Bei der Hälfte aller Betroffenen ist die Hallux-valgus-Deformität, die Abweichung der Großzehe nach lateral, mit einer Metatarsalgie vergesellschaftet (Coughlin und Jones 2007).

## 1.2 Ätiologie

Man kann die Metatarsalgie nach ihrer Ursache in strukturelle und „biomechanische“ Metatarsalgien einteilen (Dohle 2015). Espinosa et al. (2008) bezeichnen die strukturelle auch als sekundäre Metatarsalgie. Ursächlich für eine strukturelle Metatarsalgie können dabei avaskuläre Knorpel-Knochen-Nekrosen eines Metatarsaleköpfchens im Sinne eines Morbus Freiberg-Köhler sowie Arthrosen als Spätfolge eines Morbus Freiberg-Köhler sein. Auch entzündliche Erkrankungen, wie rheumatoide Arthritis können durch eine ausgelöste Synovitis des Metatarsophalangeal-Gelenks (MTP-Gelenk) Schmerzen in diesem Bereich verursachen. Neurologische Erkrankungen, wie das Morton-Neurom oder das Tarsaltunnelsyndrom, zählen ebenfalls zu diesen strukturellen Ursachen und können durch eine Kompression des Nervens Schmerzen verursachen. Auch vaskuläre und metabolische Störungen, wie arterielle Verschlusskrankheiten, venöse Insuffizienz oder Diabetes mellitus können sich durch Schmerzen im Vorfußbereich manifestieren. Die altersbedingte Atrophie des subkutanen plantaren Fettgewebes kann zusätzlich zu einer schmerzhaften Überlastung der Mittelfußköpfchen beitragen.

Seltener treten Neoplasien der Metatarsaleköpfchen oder kongenitale Fehlbildungen wie Brachymetatarsien auf.

„Biomechanische“ Metatarsalgien beruhen auf einer Störung der Bewegungsabläufe im Bereich des zentralen Vorfußes. Zu einer strukturellen Schädigung kommt es erst sekundär bei langanhaltender Störung (Dohle 2015). Dem Zehengrundgelenk kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zur Hand hat sich der Fuß zum Stand- und Fortbewegungsorgan entwickelt. Durch das plantigrade Auftreten kommt es zu einer veränderten Sehnenwirkung. Lange und kurze Beugesehnen des Fußes bewirken statt einer Flexion im Zehengrundgelenk eine Beugung im proximalen Interphalangealgelenk bei gleichzeitiger Dorsalextension im Zehengrundgelenk. Die Flexion des MTP-Gelenks erfolgt nur noch durch die intrinsische Fußmuskulatur (Mm. lumbricales und Mm. interossei). Aufgrund der muskulären Dysbalance zwischen Extensoren und Flexoren und der zusätzlich stattfindenden passiven Dorsalextension beim Abrollen des Fußes beim Laufen ist das MTP-Gelenk sehr anfällig für Extensionsfehlstellungen (Dohle 2015).

Durch die Abrollbewegung des Fußes über die metatarsophalangeale Gelenklinie kann es zur Überlastung der plantaren Gelenkkapsel (plantare Platte) kommen, welche zusammen mit den Kollateralbändern die passive Stabilisierung des Grundgelenks bildet. Aus der Überdehnung der plantaren Platte resultiert eine Instabilität des MTP-Gelenks (Dohle 2015). Die repetitive Mikrotraumatisierung der plantaren Platte kann zu einer schmerzhaften Ruptur derselben mit Luxation der Zehe im MTP-Gelenk führen (Dohle 2017).

Die permanente Hyperextensionsstellung des MTP-Gelenks bedingt durch den Druck des Zehengrundglieds eine Plantarisierung des Mittelfußköpfchens mit daraus folgender Druckerhöhung unter dem Vorfuß (Dohle 2017). Zusätzlich führt die Überlastung zur Atrophie des Fettgewebes und Nachlassen der Pufferfunktion (Arnold 2005; Dohle 2015, 2017). Die Instabilität des MTP-Gelenks wird daher als wesentlicher Faktor in der Entstehung der Metatarsalgie betrachtet (Kaipel et al. 2011).

Begünstigend auf die Schädigung der plantaren Platte wirkt sich eventuell die Belastung des Fußes auf harten Böden aus (Dohle 2017). Insbesondere anlagebedingte begünstigende Faktoren, wie die Überlänge eines Metatarsale verstärken die Überlastung der plantaren Platte und fördern die Traumatisierung (Dohle 2017).

Weiterhin kann man die Metatarsalgie nach dem Zeitpunkt ihres Auftretens während des Gangzyklus unterscheiden. Jeder Gangzyklus lässt sich in eine Standphase, welche 60 % des Zyklus ausmacht und eine Schwungphase, die 40 % ausmacht, unterteilen (Schuh und Trnka 2011). Ungefähr während der Hälfte dieses Zyklus hat der Vorfuß Bodenkontakt (Schuh und Trnka

2011). Anhand des Bodenkontakts erfolgt eine Einteilung der Metatarsalgie in statische und propulsive Metatarsalgie (Besse 2017).

Während der Standphase ist der Fuß komplett flach aufgesetzt und belastet. Alle fünf Mittelfußköpfchen befinden sich in einer Ebene, mit gleichem Abstand zum Boden. Der Neigungswinkel des Metatarsale zum Boden reduziert sich dabei von 20° (M1) zu 5° (M5) (Besse 2017). Zu diesem Zeitpunkt des Gangzyklus auftretende Schmerzen werden als statische Metatarsalgie bezeichnet (Besse 2017). Diese treten auf, wenn einzelne Metatarsalia stärker plantarflektiert sind und sich einzelne Metatarsaleköpfchen daher, im Sinne eines gestörten horizontalen Alignments, näher zum Boden befinden als andere. Die erhöhte Druckbelastung äußert sich durch Schmerzen und die Entstehung von Hyperkeratosen (Dreeben et al. 1989; Besse 2017). Dies kann durch die oben beschriebene Plantarisierung bei Instabilität des MTP-Gelenks und Kleinzehefehlstellungen hervorgerufen oder anlagebedingt sein. Kleinzehefehlstellungen sind oft mit Metatarsalgien assoziiert (Fuhrmann et al. 2005; Slullitel et al. 2016). Rheumatoide Arthritis kann ebenfalls durch den Befall des Kapselbandapparates des MTP-Gelenks zur Instabilität und Hyperextension des MTP-Gelenks, mit darauffolgender veränderter Belastungsverteilung unter dem Vorfuß beitragen (Fadel et al. 2002).

Am Ende der Standphase erfolgt das Abrollen des Fußes über die metatarsophalangeale Gelenklinie und das Abstoßen des Fußes vom Boden. Dabei hat nur der Vorfuß Bodenkontakt. Der Druck wird nun vom Vorfuß in Richtung der Zehen verlagert. Die eine Hälfte des Gewichts lastet dabei auf dem ersten Strahl, die andere Hälfte wird vom restlichen Vorfuß übernommen (Schuh und Trnka 2011). Hierbei auftretende Schmerzen sind als propulsive Metatarsalgie definiert (Besse 2017). Längendiskrepanzen gelten als eine häufige Ursache dieser Art der Metatarsalgie, wobei es durch die überlangen Metatarsalia zu einer verstärkten Belastung der plantaren Gelenkkapsel kommt (Espinosa et al. 2008). Kaipel et al. (2011) konnten allerdings keinen Zusammenhang zwischen der relativen Länge einzelner Strahlen und der Belastung in diesen Bereichen feststellen. Es wird angenommen, dass stattdessen eine Verkürzung des Gastrocnemius-Soleus-Komplexes oder Bewegungseinschränkungen im oberen Sprunggelenk ursächlich für eine Metatarsalgie sind. Die limitierte Dorsiflexion des oberen Sprunggelenks während des Gangzyklus resultiert in einem zeitigeren Abheben der Ferse mit Verschiebung der Belastung vom Rück- zum Vorfuß. Häufig werden Beschwerden im Bereich des zweiten Metatarsale beobachtet. Das zweite Tarsometatarsalgelenk ist als Amphiarthrose das steifste Gelenk des Lisfranc-Gelenkkomplexes und bietet dadurch eine besonders geringe Druckabsorption (Fadel et al. 2002; Botezatu et al. 2015; Gutteck et al. 2019).

Ferner unterscheidet man die Transfermetatarsalgie. Aus Arbeiten zu Resektionsarthroplastiken ist bekannt, dass die Insuffizienz des ersten Strahls in einer Mehrbelastung des zentralen Vorfuß mit konsekutiver Metatarsalgie resultiert (Fadel et al. 2002; Jung et al. 2005). Geng et al. (2017) konnten anhand pedobarografischer Aufnahmen zeigen, dass bei Transfermetatarsalgien nach einer Hallux-valgus-Operation die Kraftübertragung im Bereich des ersten Metatarsale und der Großzehe reduziert ist. Ursächlich für die Insuffizienz des ersten Strahls können eine ausgeprägte Hallux-valgus-Deformität, ein hypermobiler erster Strahl, Instabilität des ersten Tarsometatarsalgelenks, ein Hallux rigidus, Rückfußdeformitäten sowie eine iatrogene oder anlagebedingte Elevation des ersten Metatarsale sein (Fadel et al. 2002). Kaipel et al. (2011) beobachteten ebenfalls bei Metatarsalgie eine deutlich reduzierte Kraftübertragung unter dem ersten Metatarsale im Vergleich zur Normalbevölkerung. Slullitel et al. (2016) konnten hingegen keinen Zusammenhang zwischen der Ausprägung eines Hallux valgus und einer Metatarsalgie finden.

Tritt eine Transfermetatarsalgie in Folge einer fehlgeschlagenen Operation am Vorfuß auf, spricht man von einer iatrogenen Metatarsalgie. Eine postoperative Transfermetatarsalgie gilt als häufige Komplikation einer Hallux-valgus-Operation (Geng et al. 2017). Eine Kürzung des M1 im Vergleich zum benachbarten Metatarsale um mehr als 3 mm resultiert in bis zu 88% der Fälle in einer Transfermetatarsalgie (Nakagawa et al. 2016). Allerdings kann auch eine exzessive Kürzung anderer Metatarsalia im Vergleich zu den benachbarten zu einer Verlagerung der Beschwerden nach lateral führen. Die Inzidenz einer solchen Transfermetatarsalgie nach Veränderung der Metatarsalenparabel ist hoch. (O'Kane und Kilmartin 2002).

### **1.3 Vorfußmorphotypen**

Zur Beschreibung des Vorfußes existieren unterschiedliche Einteilungen, basierend auf der Länge der Metatarsalia bzw. ihrem Verhältnis zueinander.

Eine Möglichkeit ist die Einteilung nach Nilsonnes Metatarsalindex. Dabei wird die Länge des ersten Metatarsale im Verhältnis zum zweiten betrachtet. Ist das erste Metatarsale länger, spricht man von einem Plus-Index, umgekehrt von einem Minus-Index. Bei gleicher Länge bezeichnet man es als Plus-Minus-Index (Nilsonne 1930). In verschiedenen Studien konnte nachgewiesen werden, dass ein Minusindex als häufigste Form in der Bevölkerung auftritt (Arie et al. 2015).

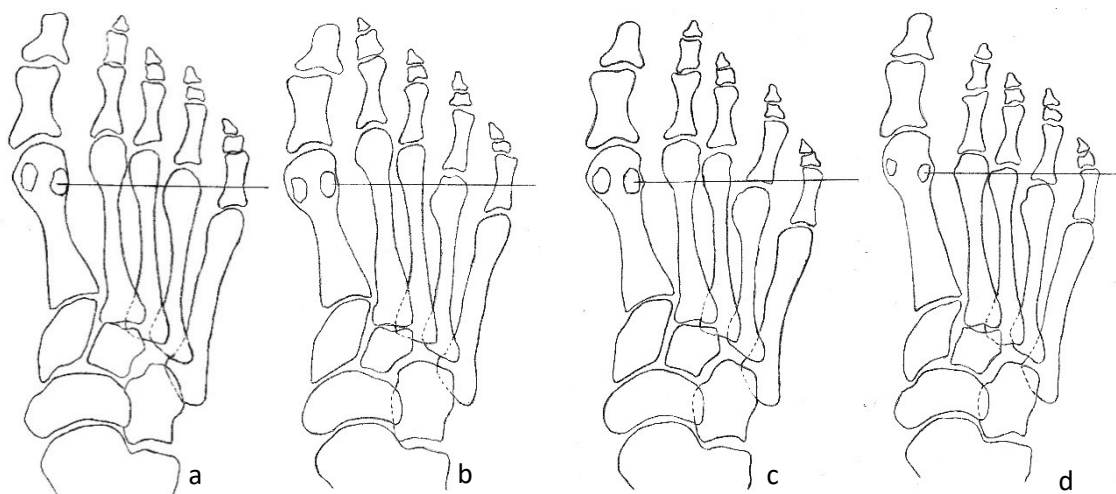
Eine weitere Variante ist ein von Maestro et al. 2003 entwickeltes Verfahren zur quantitativen Beschreibung der distalen Metatarsalenparabel anhand dorsoplantarer Röntgenaufnahmen unter Belastung. Dabei konnte zunächst die Levièvre Formel, wonach  $M1 < M2 > M3 > M4 > M5$  als ideal gilt, quantifiziert werden. Die Progression der Metatarsalia sollte dabei immer um den

Faktor 2 erfolgen. M2 sollte  $3,37 \text{ mm} \pm 0,96 \text{ mm}$  länger als M3, M3  $6,54 \text{ mm} \pm 1,03 \text{ mm}$  länger als M4, M4  $12 \text{ mm} \pm 1,91 \text{ mm}$  länger als M5 sein. Die Differenz zwischen M2 und M3 ist statistisch besonders signifikant.

Ein solcher Vorfußtyp wird nachfolgend als harmonisch definiert. Allerdings gelten nur 30 % der asymptotischen Füße als harmonisch (Maestro et al. 2003). Ein nichtharmonischer Morphotyp muss demnach nicht zwangsläufig zu behandlungsbedürftigen Beschwerden führen.

Weiterhin sind drei weitere metatarsale Morphotypen zu unterscheiden. Eine relative Überlänge von M2-M3 tritt bei 15 % (Deleu et al. 2010) bzw. 30 % (Maestro et al. 2003) der Bevölkerung auf. Durch eine Überlänge von M2 und/oder M3 kann ein Missverhältnis zwischen M2 und M3, aber auch zwischen M3 und M4 entstehen. Eine M4-M5 Hypoplasie ist gekennzeichnet durch den Verlauf der sog. SM4-Linie distal des mittleren Drittels des vierten Metatarsaleköpfchens. Dies tritt bei 37 % (Maestro et al. 2003) bzw. 53 % (Deleu et al. 2010) der Untersuchten auf. Am seltensten ist bei asymptotischen Füßen eine Überlänge des ersten Metatarsale (vgl. Abbildung 1).

Bei Hallux rigidus hingegen tritt eine Längengleichheit zwischen M1 und M2 bzw. eine M1 Überlänge sehr häufig auf (Maestro et al. 2003). Hallux-valgus-Füße weisen oft eine M4-M5 Hypoplasie bei gleichzeitiger Überlänge von M2-M3 auf (Maestro et al. 2003).



**Abbildung 1:** Maestro Morphotypen - **a:** harmonisch, **b:** M2M3 long, **c:** M4M5 Hypoplasie, **d:** M1 long  
Quelle: eigene Darstellung

#### 1.4 Symptomatik

Die Metatarsalgie äußert sich durch Schmerzen im Bereich der lateralen Metatarsaleköpfchen. Häufig ist das Gewebe an diesen Stellen entzündet und geschwollen bzw. sind Hyperkeratosen durch die anhaltende Druckbelastung vorhanden (Espinosa et al. 2008). Bei statischer Metatarsalgie sind diese direkt unter den betroffenen Metatarsaleköpfchen, bei propulsiver

Metatarsalgie eher distal davon zu finden. Auch Schmerzen im Metatarsophalangealgelenk sind kennzeichnend für eine Metatarsalgie. Oft wird eine Assoziation mit Deformitäten des ersten Strahls, wie Hallux valgus oder Kleinzehendeformitäten beobachtet (Coughlin und Jones 2007; Slullitel et al. 2016).

## **1.5 Diagnostik**

Zentraler Bestandteil der Diagnostik sind die Anamnese und klinische Untersuchung. Dabei muss für ein bestmögliches Therapieergebnis, die zugrundeliegende Pathologie genau erfasst werden. Die Beschwiellung des Fußes und Abnutzung der Schuhe können wichtige Hinweise zu Belastungszonen geben. Fragen zu Nebenerkrankungen, erfolgten Behandlungen und Operationen können Aufschluss über sekundäre und Transfermetatarsalgien geben. Inspektorisch erfolgt die Beurteilung des Auftritts, der Rückfußachse und der Längswölbung im normalen und im Zehenstand. Weiterhin müssen die Beweglichkeit des Sprunggelenks, der Großzehe und Kleinzehenfehlstellungen untersucht werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Stabilitätsprüfung des MTP-Gelenks (Dohle 2015). Als apparative Diagnostik erfolgen dorsoplantare und seitliche Röntgenaufnahmen des belasteten Fußes. Dabei können sowohl das metatarsale Alignment, der seitliche Neigungswinkel und die Sesambeine beurteilt werden, als auch der Hallux-valgus-Winkel und der Intermetatarsalwinkel bestimmt werden. Seitliche Aufnahmen erlauben es die Längswölbung des Fußes zu beurteilen sowie Luxationen der MTP-Gelenke und Beugstellungen der Zehen zu erkennen (Gutteck et al. 2019). Die MRT kommt bei speziellen Fragestellungen, wie der Detektion eines Morton Neuroms, aseptischer Knochennekrosen oder Läsionen der plantaren Platte zum Einsatz (Besse 2017). Sonographisch können Bursitiden, Ganglien, interdigitale Neurome, Sehnenpathologien und Gelenkergüsse untersucht werden (Gutteck et al. 2019). Mittels Pedobarografie können die Druckverhältnisse beim Gehen objektiviert werden (Dohle 2017).

## **1.6 Therapiemethoden**

### **1.6.1 Konservativ**

Die Behandlung der Metatarsalgie erfolgt zunächst konservativ. Generell sollten Schuhe eine adäquate Länge und Weite aufweisen. Durch Schuhzurichtungen, wie Abrollhilfen, Weichbettungen und Aussparungen kann eine Entlastung des Vorfußes erzielt werden (Schievink 2017). Mittels langsohliger Einlagen mit retrokapitaler Abstützung kann durch Anhebung der zentralen Metatarsalia eine Druckentlastung von bis zu 60 % erreicht werden (Holmes und Timmerman 1990). Bei noch erhaltener Gelenkflexibilität können auch Orthesen zur Fehlstellungskorrektur eingesetzt werden.

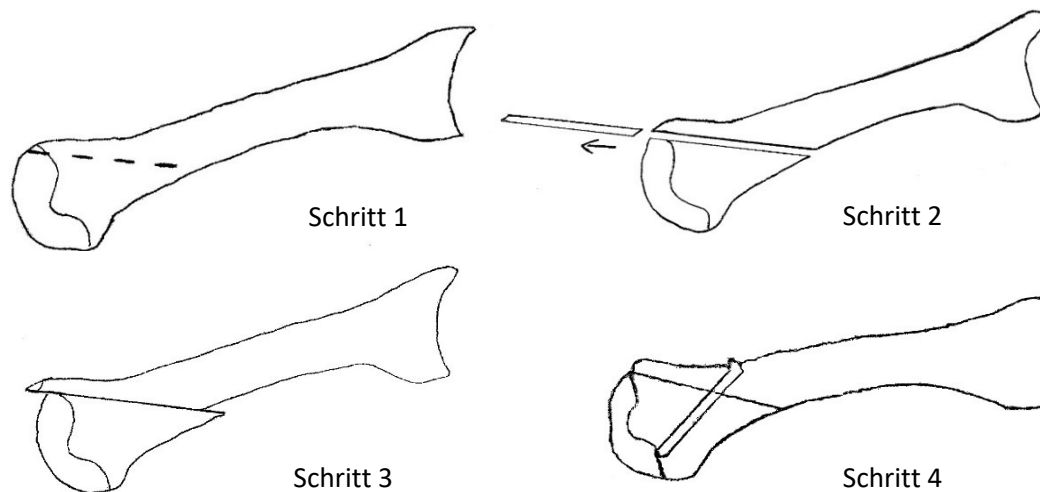
### **1.6.2 Operativ**

Im Falle einer, gegenüber konservativen Methoden resistenten, Metatarsalgie ist eine operative Versorgung zu erwägen. Ziel der Operation ist es, durch eine verbesserte Fußmorphologie und Beseitigung der Fehlstellungen, eine optimierte Druckverteilung unter dem Vorfuß zu erreichen und die Prominenz der symptomatischen Metatarsaleköpfchen zu verringern (Schuh und Trnka 2011). Eine genaue Analyse der zugrundeliegenden Pathologie ist essenziell. Eine zusätzliche Korrektur des ersten Strahls ist häufig, insbesondere bei Vorliegen einer Transfermetatarsalgie, unablässig. Die Annäherung an den idealen Vorfußmorphotyp nach Maestro (Maestro et al. 2003) wird angestrebt. Dabei muss auch die Neigung der Metatarsalia berücksichtigt sowie ein adäquater Bodenkontakt der Metatarsaleköpfchen hergestellt werden (Espinosa et al. 2008). Maestro et al. (2003) empfehlen, die Korrektur auf den symptomatischen Strahl zu beschränken und Eingriffe an weiteren Metatarsalia zu vermeiden, es sei denn, dies würde zu einem disharmonischen Vorfußmorphotyp führen, mit dem entsprechenden Risiko einer Transfermetatarsalgie. Daher ist häufig eine Korrektur weiterer asymptomatischer Strahlen nötig, um die korrekten Längenverhältnisse zu wahren.

Auf die operativen Verfahren soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

### **1.7 Weil-Osteotomie**

Heute sind mehr als 25 verschiedene Osteotomien für die lateralen Metatarsalia beschrieben (Prado et al. 2016). Meisenbach beschrieb 1916 die erste Osteotomie zur Behandlung der Metatarsalgie - eine diaphysäre Osteotomie der Metatarsalia. Später wurden proximal metaphysäre (Mau 1940) und distal metaphysäre Verfahren (Borggreve 1949) beschrieben. Helal beschrieb 1975 eine Modifikation der bisherigen diaphysären Osteotomie – eine Schrägosteotomie in der distalen Hälfte des Metatarsaleschaftes von proximal nach distal verlaufend. Mit der von Weil 1985 beschriebenen subkapitalen Verkürzungsosteotomie (Barouk 1996) ergab sich eine Technik, mit der die Verschiebung der Metatarsaleköpfchen sicherer geplant werden konnte (Coillard et al. 2010). Diese gilt bis heute als Standardeingriff zur Behandlung der Metatarsalgie. Durch die Weil-Osteotomie kann eine Verschiebung des Metatarsaleköpfchens nach proximal, in geringem Ausmaß auch eine Seitverschiebung und Elevation erreicht werden. Durch eine dosierte Verkürzung des Metatarsale gelingt eine axiale Dekompression desselben (Espinosa et al. 2008) (vgl. Abbildung 2).



**Abbildung 2:** schematische Darstellung einer Weil-Osteotomie  
Quelle: eigene Darstellung

Indiziert ist die Weil-Osteotomie zur Therapie der Metatarsalgie insbesondere bei überlangen Metatarsalia, Subluxationen bzw. Dislokationen oder rheumatischen Deformitäten der MTP-Gelenke (Zirm 2012) sowie bei „kontrakten Kleinzehendeformitäten mit dorsaler Luxation der Grundphalanx“ (Fuhrmann 2012, S. 99). Bei plantarflektierten Metatarsalia bzw. gestörtem horizontalem Alignment ist die Wirksamkeit der Weil-Osteotomie limitiert. Die Weil-Osteotomie bewirkt zwar eine Verkürzung, aber keine suffiziente Anhebung der Metatarsaleköpfchen (Barouk 1996; Gibbard und Kilmartin 2003).

Als häufigste Komplikationen nach einer Weil-Osteotomie gelten die Steifigkeit des MTP-Gelenks und floating toes (Schuh und Trnka 2011). Als floating toe bezeichnet man eine Zehe, welche bei Belastung des Fußes keinen Bodenkontakt hat (Migues et al. 2004) (vgl. Abbildung 3). Die resultierende eingeschränkte Beweglichkeit der Zehe führt zu funktionellen Einschränkungen, wobei je nach Schweregrad auch asymptotische Verläufe möglich sind (Highlander et al. 2011). In einer Metaanalyse traten in 36 % der Fälle floating toes auf (Highlander et al. 2011). Hofstaetter et al. verzeichneten 2005 postoperativ bei 48 % der Fälle eine eingeschränkte Beweglichkeit des MTP-Gelenks. Des Weiteren wird auch eine Instabilität des MTP-Gelenks als postoperative Komplikation berichtet (Bevernage und Leemrijse 2008; Zirm 2012). Durch die Verschiebung des Metatarsaleköpfchens kommt es zur Insuffizienz der Beugemuskulatur und zur Schwächung der plantaren Platte (Perez et al. 2008). Der dorsale Zugang und die Kapsulotomie können im Rahmen der Narbenbildung zur Kontraktur der Gelenkkapsel führen (Trnka et al. 2001). Zur Vermeidung von floating toes kann das MTP-Gelenk postoperativ z.B. mit Hilfe eines Kirschner-Drahtes in leichter Plantarflexion fixiert werden (Barouk 1996; Trnka et al. 2001), wobei der Erfolg überschaubar ist (Gregg et al. 2007). Als häufigste Komplikation einer solchen Fixierung werden Pin-Infekte beobachtet (Wei et al. 2020),



wobei in einer retrospektiven Studie mit 1115 Hammerzehkorrekturen und Fixierung mittels Kirschnerdraht für im Mittel 39 Tage lediglich bei 0,3 % Pin-Infektionen beobachtet wurden (Kramer et al. 2015). Ähnliches berichten auch Richman et al. (2017) und Obrador et al. (2018) bei einer Fixierung über jeweils 6 Wochen mit Infektionsraten von 3,2 % bzw. 4,6 %. Weiterhin kann durch eine Verlängerung der Extensorsehne, einen Flexor-Extensorsehnentransfer und eine Rekonstruktion der plantaren Platte einem Abheben der Zehe vorgebeugt und die Stabilität im MTP-Gelenk verbessert werden (Trnka et al. 2001; Perez et al. 2008).



**Abbildung 3:** Patientin mit *floating toe* nach *Hallux valgus* Korrektur und Weil-Osteotomie  
Quelle: eigenes Archiv

In einer Übersichtsarbeit berichteten Highlander et al. (2011) von einem postoperativen Wiederauftreten der Metatarsalgie in durchschnittlich 12,5 % der Fälle. Die Spannweite reicht hierbei von 0% (Migues et al. 2004) bis 28% der Fälle (Trnka et al. 1999). Durch eine ungünstig verlaufende Osteotomieebene kann es zur Plantarisierung des Metatarsaleköpfchens und erneut zur Metatarsalgie kommen (Schuh und Trnka 2011). Eine übermäßige Kürzung einzelner Metatarsalia kann zur Entstehung einer Transfermetatarsalgie beitragen. Diesbezüglich wurden in der Literatur Inzidenzraten von 0% (Trnka et al. 2002) bis 18,8% (Garg et al. 2008) berichtet. Auch ein Wiederauftreten der plantaren Hyperkeratosen ist möglich (Vandeputte et al. 2000). Hinzu kommen Schmerzen und Bewegungseinschränkungen verursacht, durch Materialkonflikte, Wundheilungsstörungen, kontrakte Narben und Infektionen. Verzögerte Knochenheilung oder die Bildung von Pseudoarthrosen treten selten auf (Highlander et al. 2011).

### **1.8 Distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie**

Ein alternatives OP-Verfahren stellt die distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie dar. Nachfolgend soll dieses nun im Vergleich zum konventionellen Verfahren der Weil-Osteotomie betrachtet werden. Ziel der Operation ist wie bei der Weil-Osteotomie eine Anhebung und Kürzung des betreffenden Metatarsale (Botezatu et al. 2015).

Ein perkutanes Vorgehen birgt viele potenzielle Vorteile. Durch den kleineren Zugang ist die Morbidität geringer als bei einem offenen Vorgehen (Bauer 2014). Insbesondere bei kritischen Weichteilverhältnissen bietet sich das minimalinvasive Vorgehen an, da durch die kleine Inzision im Vergleich zum konventionellen offenen Verfahren auch das Risiko einer Wundheilungsstörung sinkt (Redfern et al. 2015). Hinzu kommt eine, durch die geringere Gewebsinvasivität weniger ausgeprägte dorsale Fibrosierung und Narbenkontraktion mit einem besseren kosmetischen Ergebnis. Da es sich um ein extraartikuläres Verfahren handelt, ist die Rate postoperativer Gelenksteifheit ebenfalls reduziert (Coillard et al. 2010; Botezatu et al. 2015). Dank des minimalinvasiven Vorgehens sind postoperative Nachbehandlungs- und Rehabilitationszeiten kürzer (Bauer 2014).

Zu den Nachteilen der DMMO zählt die Notwendigkeit eines speziellen Equipments (Bauer 2014). Zusätzlich erfordert die Operation einen erfahrenen Chirurgen mit genauen Anatomiekenntnissen und gutem räumlichen Vorstellungsvermögen. Die Lernkurve bis zur korrekten Durchführung der Operation ist lang (Bauer 2014). Postoperativ ist außerdem, bei fehlendem Einsatz von Osteosynthese, ein besonderes Management mit Anlegen von Tape-Verbänden notwendig.

Da keine Osteosynthese zur Fixierung eingesetzt wird, ist eine schlechte Osteotomieheilung eine zu befürchtende Komplikation. Eine symptomatische Pseudoarthrosenbildung wird dagegen selten beobachtet, allerdings tritt in 5 % der Fälle eine verzögerte Knochenheilung auf. Betroffen ist dabei vor allem das zweite Metatarsale, weniger die lateralen Metatarsalia. In den meisten Fällen tritt aber auch ohne weitere Maßnahmen innerhalb von sechs bis zwölf Monaten postoperativ eine vollständige Heilung ein (Redfern und Vernois 2016).

Zusätzlich kommt es durch die dynamische Korrektur regelmäßig zu einer Lateralisierung des Metatarsaleköpfchens. Die Kräfte der Extensoren und Flexoren führen insbesondere am zweiten und dritten Strahl zu Abweichungen der Metatarsaleköpfchen nach lateral. Eine gleichzeitig ausgeführte Hallux-valgus-Korrektur kann diese Abweichungstendenz durch die Lateralisierung des ersten Metatarsaleköpfchens verstärken (Redfern et al. 2015). Allerdings kann der exzessiven Lateralisierung durch richtiges Taping effektiv entgegengewirkt werden, weshalb selten klinische Probleme daraus resultieren (Redfern et al. 2015).

Eine weitere Komplikation ist eine vermehrte Ödembildung im Bereich des Vorfußes, welche in einigen Fällen bis zu sechs Monaten postoperativ anhält (Haque et al. 2016).

Bei mangelhafter Operationstechnik kann es zu hitzebedingten Weichteilschäden sowie zu einem falschen Winkel und falscher Positionierung der Osteotomieebene kommen (Redfern und

Vernois 2016), wodurch postoperativ Beschwerden persistieren oder sich eine Transfermetatarsalgie entwickeln kann.

Starke Dislokation oder kontrakte Luxation des MTP-Gelenkes stellen eine relative Kontraindikation der DMMO dar. Hier kann die DMMO nur als „palliatives“ Verfahren angewendet werden (Prado et al. 2016). Eine komplette Gelenkwiederherstellung ist nicht möglich, jedoch kann eine Symptomlinderung erzielt werden (Botezatu et al. 2015; Prado et al. 2016).

## 2 Zielsetzung der Arbeit

In dieser Studie sollen mittelfristige Ergebnisse einer Vorfußkorrektur zur Behandlung einer chronischen Metatarsalgie mittels DMMO mit solchen einer Weil-Osteotomie verglichen werden. Dabei soll anhand klinischer, radiologischer und pedobarografischer Parameter geprüft werden, wie sich das Ein-Jahres-Outcome nach einer DMMO von einer Weil-Osteotomie unterscheidet.

Für die Arbeit ergeben sich daher folgende Fragestellungen:

1. Welchen Einfluss hat das gewählte Operationsverfahren auf das klinische Outcome bei Patienten mit Metatarsalgie?
2. Welche Rolle spielt die Beweglichkeit des MTP-Gelenks?
3. Wie wirkt sich das gewählte Operationsverfahren auf den AOFAS-Vorfußscore und den FFI-Score aus?
4. Wie beeinflusst die Operationsmethode den Vorfußmorphotyp nach Maestro?
5. Wie verändert sich die plantare Druckverteilung postoperativ in Abhängigkeit von der gewählten Operation?
6. Wie korrelieren pedobarografische Parameter mit AOFAS-Score, FFI-Score und Maestro-Morphotyp?
7. Welchen Einfluss hat die Stellung des ersten Strahls (HVA, IMA) auf die plantare Druckverteilung?
8. Wie wirkt sich die postoperative Einstellung des MT-I in der Sagittalebene auf die plantare Druckverteilung aus?

### **3 Material und Methodik**

Im Zeitraum vom Februar 2017 bis Dezember 2018 wurde die im Folgenden beschriebene Studie am Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (DOUW) des Universitätsklinikums Halle (Saale) durchgeführt.

Insgesamt wurden dabei 77 konsekutive Patienten mit chronischer Metatarsalgie unter Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien untersucht. Davon erhielten 41 Patienten (44 Füße) eine distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie (DMMO). Diese wurden mit 36 Patienten (40 Füße) verglichen, welche im Zeitraum vom April 2010 bis Oktober 2014 am DOUW aufgrund einer Metatarsalgie behandelt worden sind und eine Weil-Osteotomie erhielten. Ein positives Votum der Ethikkommission liegt vor.

#### **3.1 Ein- und Ausschlusskriterien**

Als Einschlusskriterien galten die Indikation zu einer DMMO oder einer Weil-Osteotomie sowie das Einverständnis zur Teilnahme an der Studie. Daten bezüglich des Alters, der Größe, des BMI und des Geschlechts wurden erhoben, spielten aber keine Rolle für den Einschluss in die Studie. Ausschlusskriterien waren, neben Ablehnung der Studienteilnahme, akute Traumata oder Amputationen im Bereich des Fußes, operative Eingriffe am Rückfuß, Arthrose des oberen Sprunggelenks mit eingeschränkter Beweglichkeit, eine schwere rheumatische Deformität des Fußes, vaskuläre und neurologische Erkrankungen, insbesondere Polyneuropathie sowie ein nicht eingestellter Diabetes mellitus.

#### **3.2 Unerwünschte Ereignisse**

Zu den vorab definierten unerwünschten postoperativen Ereignissen zählten floating toes, ein Wiederauftreten der Metatarsalgie bzw. eine Transfermetatarsalgie, Pseudoarthrosen, Wundheilungsstörungen und -infektionen.

#### **3.3 Klinische Untersuchung und Anamnese**

Die Untersuchungen wurden routinemäßig präoperativ sowie zwei Wochen, sechs Wochen und zwölf Monate postoperativ durchgeführt. Es erfolgte eine gründliche Anamnese bezüglich aktueller Beschwerden der Patienten, Schuhkonflikten und plantaren Druckstellen. Weiterhin wurden Funktionseinschränkungen des Fußes, Belastungsschmerzen nach längerem Stehen und Gehen sowie eine Progredienz der Fußfehlstellung erfasst. Ferner mussten sekundäre Ursachen der Metatarsalgie, wie Diabetes mellitus, akute Entzündungen, neurogene Erkrankungen sowie Gefäßerkrankungen ausgeschlossen werden.

Anschließend erfolgte die körperliche Untersuchung. Als erstes erfolgte eine Inspektion des Fußes. Dabei wurde zunächst das Gangbild des Patienten betrachtet. Im entspannten Stand erfolgte die Beurteilung der medialen Fußwölbung sowie des Rückfußes, um festzustellen, ob ein plantigrader Stand vorliegt oder ob Rückfußdeformitäten vorhanden sind. Lag eine Abweichung der Rückfußachse vor, wurde diese nochmals im einbeinigen Zehenstand des Patienten, dem sog. „Single-heel-rise“-Test untersucht. Eine fehlende Varisierung der Ferse war hier hinweisend auf eine gravierende Rückfußpathologie (Dohle 2012).

Als nächstes wurde die Fußsohle inspiziert, hinsichtlich trophischer Hautveränderungen und Hyperkeratosen, welche Hinweise auf eine veränderte Belastung des Vorfußes geben können (Dohle 2012).

Zusätzlich wurde die Beweglichkeit des Sprunggelenks und der Großzehe untersucht, insbesondere hinsichtlich Schmerzen bei Bewegung und Krepitationen. Auch eine mögliche Instabilität des Tarsometatarsalgelenkes I wurde geprüft, da diese als häufige Ursache für einen Hallux valgus gilt (Coughlin und Jones 2007). Diese äußert sich durch eine verstärkte relative Verschieblichkeit des ersten Metatarsale gegenüber dem zweiten. Dazu fixierte der Untersucher mit einer Hand den lateralen Mittelfuß des Patienten, samt dem zweiten Metatarsale und bewegte MT-I nach dorsal und plantar. Eine Beweglichkeit von bis zu 10 mm wurde hierbei als physiologisch angesehen. Um mögliche Einflüsse der Beweglichkeit des oberen Sprunggelenks auszuschließen, erfolgte die Prüfung am sitzenden und stehenden Patienten in Neutralnullstellung des Sprunggelenks.

Bei der Untersuchung der Kleinzehen wurde auf das Vorhandensein von Fehlstellungen und Extensionskontrakturen geachtet. Dabei war wichtig zu unterscheiden, ob es sich um eine rigide oder flexible, d. h. manuell redressierbare, Fehlstellung handelt, da dies für die Wahl des operativen Behandlungsverfahrens entscheidend ist. Erfasst wurde auch, ob die Zehenkuppen Bodenkontakt hatten, da ein Verlust des Bodenkontaktes einem Funktionsverlust der Zehe gleichkommt. Eine kontrakte Luxation ließe sich als subkutane Stufe tasten.

Anschließend wurde die Beweglichkeit und die Stabilität der Zehengelenke, insbesondere des Zehengrundgelenks, getestet. Dabei wurde der Bewegungsumfang bestimmt, wobei auf Schmerzen, Krepitationen und Instabilitäten geachtet wurde. Zur Testung der Stabilität fixierte der Untersucher den Mittelfuß mit einer Hand und führte mit der anderen eine Translationsbewegung der Zehe nach dorsal und plantar aus. Eine eventuelle pathologisch erhöhte Beweglichkeit konnte so im Vergleich mit benachbarten Gelenken bzw. dem kontralateralen Fuß identifiziert werden.

Abschließend wurden noch Durchblutung, Motorik und Sensibilität der Extremität überprüft.

Bei der postoperativen Untersuchung wurden die Patienten hinsichtlich eines Wiederauftretens der Schmerzen befragt. Zudem wurde geprüft, ob ein Druck- oder Bewegungsschmerz auslösbar war. Die Wundverhältnisse wurden untersucht sowie hinsichtlich Anzeichen eines Materialkonfliktes überprüft. Abschließend wurde die Achseinstellung des ersten Strahls und der Kleinzehen im Stand beurteilt und die Beweglichkeit der MTP-Gelenke geprüft.

### **3.4 AOFAS-Score**

Präoperativ sowie zwölf Monate postoperativ wurde der Vorfußscore der American Orthopaedic Foot and Ankle Society (vgl. Abbildung 4) (Kitaoka et al. 1994) erhoben. Dies geschah von ein und demselben Untersucher, welcher nicht der Operateur war.

Der AOFAS-Score setzt sich insgesamt aus acht Fragen zusammen. Drei davon sind subjektive Patientenfragen und werden vom Probanden selbst beantwortet. Zur Beantwortung der verbleibenden fünf sind entsprechende Vorkenntnisse nötig. Diese werden daher vom Untersucher beantwortet.

Insgesamt können maximal 100 Punkte erreicht werden, welches einem gesunden Fuß ohne Funktionseinschränkungen entspräche. Die Gesamtpunktzahl ergibt sich aus Schmerzlosigkeit (40 Punkte), voller Funktionalität (45 Punkte) sowie physiologischer Achsenstellung (15 Punkte). Die Funktionalität wird nochmals untergliedert in Aktivitätseinschränkungen bzw. das Benötigen von Hilfsmitteln (10 Punkte), verwendetes Schuhwerk (10 Punkte), MTP-Gelenksbeweglichkeit (10 Punkte) sowie Interphalangealgelenksbeweglichkeit, MTP-IP-Stabilität und Callusbildung (jeweils mit 5 Punkten gewertet).

### **3.5 FFI-Score**

Für Patienten, die eine DMMO erhielten, wurde zusätzlich der Foot Function Index (Budiman-Mak et al. 1991; Riskowski et al. 2011) (siehe Anhang) präoperativ sowie ein Jahr postoperativ erhoben. Dieser besteht aus 23 Fragen, welche sich in die drei Untergruppen Schmerz (9 Fragen), Behinderung (9 Fragen) und Aktivitätseinschränkungen (5 Fragen) gliedern. Der Patient schätzt diese selbst, hinsichtlich der letzten Woche, auf einer Skala von 0 bis 9 ein. Die Werte der einzelnen Skalen werden summiert und als Prozentanteil des höchstmöglichen Scorewertes ausgedrückt. Insgesamt können Werte zwischen 0 und 100 % erreicht werden, wobei höhere Werte gleichbedeutend mit schlechterer Gesundheit und Lebensqualität sind.

<b>Schmerz (40 Punkte)</b>	
Kein	40
Mild, gelegentlich	30
Moderat, täglich	20
Schwer, fast immer präsent	0
<b>Funktion (45 Punkte)</b>	
<b>Aktivitätseinschränkungen/ Verwendung von Hilfsmitteln</b>	
Keine Einschränkung, keine Hilfsmittel benötigt	10
Keine Einschränkung bei täglichen Aktivitäten, Einschränkung bei Freizeitaktivitäten (z.B. Sport), keine Hilfen	7
Einschränkung bei täglichen Aktivitäten/Freizeitaktivitäten; Verwendung eines Gehstocks	4
Starke Einschränkung; Verwendung von Rollator oder Rollstuhl	0
<b>Verwendetes Schuhwerk</b>	
Modische konventionelle Schuhe ohne Einlagen	10
Komfortschuhe mit Einlagen	5
Modifizierte orthopädische Schuhe oder Stützen	0
<b>MTP-Gelenk Beweglichkeit (Dorsiflexion und Plantarflexion)</b>	
Normal oder leichte Einschränkung (75° oder mehr)	10
Moderate Einschränkung (30°-74°)	5
Starke Einschränkung (weniger als 30°)	0
<b>IP-Gelenk Beweglichkeit</b>	
Keine Einschränkung	5
Stark eingeschränkt (weniger als 10°)	0
<b>MTP-IP Stabilität</b>	
Stabil	5
Instabil oder dislozierbar	0
<b>Callus in Bezug auf MTP-Gelenke/ IP-Gelenke 2-5</b>	
Kein Callus vorhanden bzw. asymptomatisch	5
Callus vorhanden, symptomatisch	0
<b>Fußgeometrie (15 Punkte)</b>	
Gut, Zehen achsengerecht	15
Mittelmäßig, gewisse Achsenabweichung, asymptomatisch	8
Schlecht, symptomatische Achsenfehlstellung	0

**Abbildung 4:** Vorfußscore nach AOFAS für die Vorfußstrahlen 2-5  
Quelle: Kitaoka et al. 1994, S.352

### 3.6 Radiologische Untersuchung

Die radiologische Untersuchung erfolgte anhand standardisierter Röntgenaufnahmen des Fußes im dorsoplantaren und lateralen Strahlengang im Stehen. Diese erfolgten routinemäßig präoperativ, vor Entlassung, sechs Wochen sowie zwölf Monate postoperativ.



Zur Beurteilung des Fußskeletts wurden der Hallux-valgus-Winkel (HVA), der Intermetatarsalwinkel (IMA) sowie der Metatarsalindex nach Maestro bestimmt. Dies erfolgte anhand der dorsoplantaren Röntgenaufnahmen. Der Elevationswinkel des MT-I (ELE) wurde mit Hilfe der Aufnahmen im lateralen Strahlengang bestimmt.

Der HVA bezeichnet den Winkel zwischen den Schafthalbierenden des Großzehengrundglieds und des MT-I. Der IMA beschreibt den Winkel zwischen den geometrischen Achsen des MT-I und MT-II (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Dorsoplantare Röntgenaufnahme des rechten Fußes mit HVA und IMA

Quelle: eigenes Archiv, eigene Darstellung

Der Metatarsalindex wurde anhand der von Maestro 2003 entwickelten Formel bestimmt. Dazu wurde senkrecht zur Sagittalachse, auch M2-Achse genannt, welche vom Mittelpunkt des Rückfußes (zwischen medialem Aspekt des Taluskopfes und isolateraler Ecke des Calcaneus) zum Köpfchen des MT-II verläuft, die sog. SM4-Linie definiert. Diese verläuft vom lateralen Sesamoid des MT-I durch das mittlere bzw. distale Drittel des MT-IV-Köpfchens senkrecht zur Sagittalachse. Anschließend wurden Tangenten, parallel zur SM4-Linie, an die Metatarsaleköpfchen angelegt und ihr Abstand zu dieser bestimmt (vgl. Abbildung 6). Anhand dessen erfolgte die Berechnung des Verhältnisses der einzelnen Metatarsalia zueinander als M1-M2-Index (MT-I Köpfchen zu SM4 - MT-II-Köpfchen zu SM4) bzw. als M2-M3-Index, M3-M4-Index, M4-M5-Index (Maestro et al. 2003).

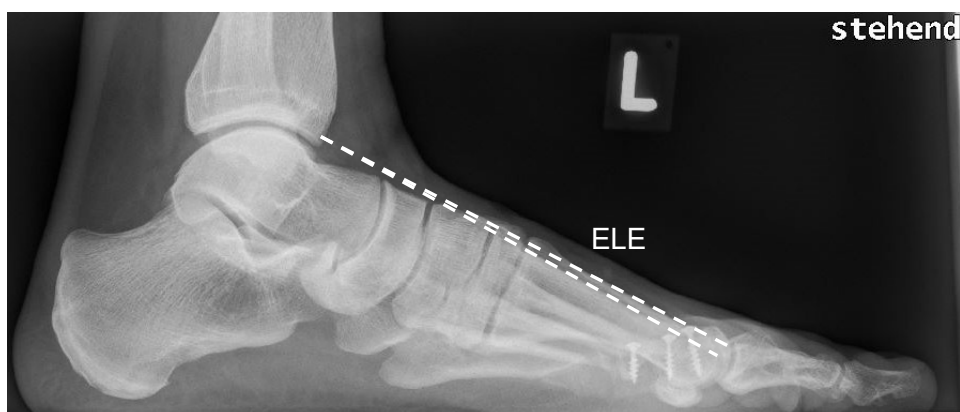


**Abbildung 6:** Dorsoplantare Röntgenaufnahme des rechten Fußes mit M2-Achse und SM4-Linie zur Bestimmung des Metatarsalindex nach Maestro

Quelle: eigenes Archiv, eigene Darstellung

Der Index beschreibt theoretisch den idealen Vorfußmorphotyp und erlaubt daher Rückschlüsse auf die prä- und postoperative Stellung der Metatarsalia zueinander und die Metatarsalenparabel.

Zur Bestimmung des Elevationswinkels wurden Linien an die dorsale Kortikalis zwischen Basis und Köpfchen des Metatarsale gelegt (vgl. Abbildung 7), anhand derer die Abweichung des MT-I im Vergleich zum MT-II gemessen werden konnte.



**Abbildung 7:** Laterale Röntgenaufnahme des linken Fußes mit positivem Elevationswinkel

Quelle: eigenes Archiv, eigene Darstellung

Je nach Flexionsgrad des MT-I konnten numerisch positive - bei tiefer als MT-I stehendem zweiten Metatarsale - und negative Winkel auftreten.

Um den Einfluss der Elevation des MT-I auf das klinische Outcome und die postoperative Druckverteilung besser abschätzen zu können, erfolgte eine zusätzliche Einteilung der Patienten in zwei Gruppen mit postoperativ negativem bzw. positiven Elevationswinkel.

### 3.7 Pedobarografische Untersuchung

Zur objektiven Beurteilung der Druckverteilung des Fußes wurden präoperativ und zwölf Monate postoperativ routinemäßig eine pedobarografische Untersuchung durchgeführt.

Dabei können die zeitliche und räumliche Kraftverteilung während des Gehens gemessen werden. Zudem können mittlere und maximale Kräfte und Drücke für einzelne Bereiche sowie für den kompletten Fuß ermittelt werden. Die Belastung kann somit einzelnen Regionen des Fußes zugeordnet werden. Damit erlaubt die Pedobarografie eine objektive Beurteilung der postoperativen Druckverteilung im Vergleich zum präoperativen Ausgangsbefund. Das Kraft-Zeit-Integral (Impuls) gilt dabei als sehr aussagekräftiger Parameter, da es darstellt, wie sich die einwirkende Kraft während der Dauer der Belastung über einem bestimmten Bereich des Fußes verteilt, und somit klinisch relevante Hinweise für die Beanspruchung liefern kann.

#### 3.7.1 Messgerät

Die Pedobarografie wurde mit Hilfe der emed<sup>®</sup> x400 Sensorplatte der Firma Novel (Novel GmbH München) durchgeführt (vgl. Abbildung 8). Es handelt sich dabei um eine Sensorfläche von 475 x 320 mm und 15,5 mm Höhe, die sich in der Mitte einer Gangbahn befindet. Die Bahn hat eine Länge von 9 m, ist 70 cm breit und befindet sich in einer Ebene mit der Sensorplatte. Insgesamt befinden sich auf der Platte 6080 Sensoren, jeweils 4 pro Quadratzentimeter, welche mit einer Frequenz von 100 Hz den auf ihnen lastenden Druck messen. Die Messgenauigkeit wird vom Hersteller mit einer maximalen Abweichung von fünf Prozent vom gemessenen Wert angegeben.



**Abbildung 8:** Gangbahn mit Messplatte  
Quelle: eigenes Archiv

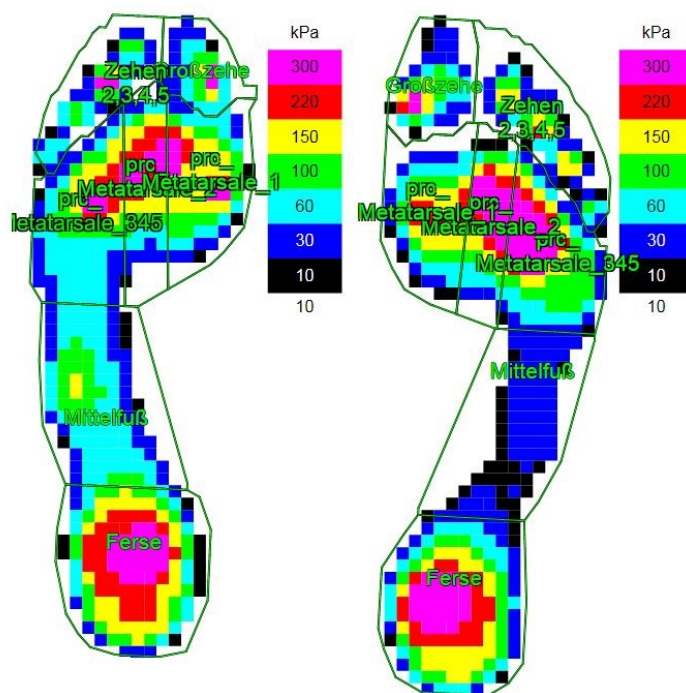
### 3.7.2 Durchführung der Messung

Die Patienten stellten sich barfuß am Rande der Gangbahn auf. Sie wurden dazu angehalten, möglichst natürlich mit selbst gewählter Geschwindigkeit zu gehen. Dabei sollten die Patienten geradeaus blicken, nicht auf den Boden oder die Messplatte, um Verfälschungen der Schrittlänge zu vermeiden. Weiterhin wurden mehrere Probedurchgänge gemacht, um die optimale Startposition zu finden, damit der Patient mit dem kompletten Fuß in möglichst natürlichem Gang auf die Sensorplatte trat. So konnten Messungen gewonnen werden, welche so genau wie möglich die Verhältnisse in einer realen Alltagssituation abbilden.

Die Messung wurde wiederholt bis von jedem Fuß des Patienten im Durchschnitt zehn Abdrücke vorhanden waren. Bei unvollständigen Abdrücken oder Nichterfüllen der o. g. Kriterien wurde die Messung verworfen und wiederholt.

Der Fußabdruck wurde automatisch mit Hilfe einer anatomisch korrekten Maske gleichermaßen unterteilt (vgl. Abbildung 9). Bei Ungenauigkeiten z.B. aufgrund von Fußdeformitäten wurde die Maske manuell angepasst. Es erfolgte eine Gliederung des Fußes in sieben Zonen: Ferse, Mittelfuß, Vorfuß, Großzehe, Kleinzehen. Der Vorfußbereich wurde noch weiter aufgegliedert in die Regionen medialer, zentraler und lateraler Vorfuß.

Gemessen wurden der Spitzendruck in Kilopascal (kPa) und das Kraft-Zeit-Integral (N\*s bzw. %BW\*s). Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Gruppen und Probanden zu gewährleisten, wurden die Kräfte im Verhältnis zum jeweiligen Körpergewicht betrachtet.



**Abbildung 9:** Fußabdruck mit Pedobarografiemasken  
Quelle: eigenes Archiv

### **3.8 Operationstechnik**

#### **3.8.1 Weil-Osteotomie**

Der Zugang erfolgt über eine dorsale Hautinzision über dem Metatarsophalangealgelenk. Zunächst muss das Metatarsaleköpfchen dargestellt werden. Dazu wird die Extensorsehne identifiziert, eine Kapsulotomie durchgeführt und die Seitenbänder durchtrennt. Danach kann das Köpfchen mit Hilfe zweier Hohmann-Haken umfahren und leicht angehoben werden. Anschließend erfolgt die Osteotomie im Sinne eines schrägen von dorsal distal nach plantar proximal verlaufenden Knochensägeschnittes. Diese erfolgt retrokapital und intraartikulär. Die Neigung der Osteotomieebene beträgt dabei je nach Fuß und Metatarsale etwa 20°. Dabei variiert der Neigungswinkel zwischen MT-II und MT-IV aufgrund der geringeren Plantarflexion der lateralen Metatarsalia. Um eine Plantarisierung des Metatarsaleköpfchens zu vermeiden, erfolgt die Entnahme einer Knochenscheibe (Melamed et al. 2002). Das Köpfchen kann nun mobilisiert und bis zur gewünschten Position nach proximal verschoben werden. Die Fragmente werden in dieser Position fixiert und es erfolgt eine Bildwandlerkontrolle, um zu überprüfen, ob das optimale Vorfußalignment erreicht worden ist. Mittels Schraubenosteosynthese wird das gewünschte Ergebnis fixiert. Die überstehenden Knochenanteile werden mit Hilfe eines Luers entfernt.

#### **3.8.2 Distale minimalinvasive metatarsale Osteotomie**

Zuerst erfolgt eine Stichinzision lateral des Metatarsaleköpfchens parallel zur Extensorsehne. Über diese Inzision kann nun eine Fräse eingebracht werden. Mittels Bildwandler wird die korrekte Höhe der Fräse am diaphysären-metaphysären Übergang kontrolliert. Nun erfolgt extrakapsulär die Osteotomie im 45° Winkel zur Längsachse des Metatarsale von proximal plantar nach distal dorsal. Während der Prozedur erfolgt die Kühlung des Gewebes durch Spülung mit Kochsalzlösung, um eine Hitzeschädigung durch die Fräse zu vermeiden. Nach korrekter Durchführung der Osteotomie kann das Köpfchen mobilisiert werden. Die Einstellung des osteotomierten Metatarsaleköpfchens erfolgt spontan. Die Osteotomiehöhe und das erzielte Vorfußalignment wird fluoroskopisch kontrolliert. Abschließend wird die Wunde gespült und ein Tape-Verband zur Stabilisierung angelegt. Eine Osteosynthese findet nicht statt. Da kein Osteosynthesematerial eingebracht wird, handelt es sich um eine dynamische Korrektur. Die Stabilisierung erfolgt nur durch die intakte Gelenkkapsel, die Seitenbänder sowie durch spezielles Taping (Redfern et al. 2015). Postoperativ ist eine Belastung im Verbandsschuh sofort möglich. Die unfixierten Metatarsaleköpfchen richten sich dabei nach und nach durch die Belastung aus. (Botezatu et al. 2015; Redfern und Vernois 2016)

### 3.9 Statistische Auswertung

Die errechneten Scorewerte sowie die radiologisch gemessenen Winkel und Metatarsalelängen wurden mit Hilfe des Programms Microsoft Excel ausgewertet. Zur Analyse der pedobarografischen Daten wurden diese aus der Software emed® in Excel exportiert.

Die statistische Auswertung der Daten und Diagrammdarstellung erfolgte mit Hilfe des Programms IBM SPSS Statistics 25. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt. Mittels des Shapiro-Wilk Tests wurde die Normalverteilung geprüft. Die Varianzgleichheit wurde anhand des Levene-Tests sichergestellt. Im Falle einer Normalverteilung erfolgte die Prüfung auf signifikante Unterschiede mittels t-Test bei abhängigen bzw. unabhängigen Stichproben. Alternativ kamen bei nicht normalverteilten Stichproben der Mann-Whitney-U-Test bzw. der Wilcoxon-Test zum Einsatz. Die Häufigkeitsunterschiede kategorialer Variablen wurden mittels Chi-Quadrat-Test untersucht. Bei Fallzahlen unter fünf kam stattdessen der Fisher-Exakt-Test zum Einsatz.

Korrelationen zwischen metrischen Parametern wurden durch den Pearson Korrelationskoeffizient untersucht. Bei der Untersuchung von nominalen und metrischen Variablen wurde der Eta-Koeffizient berechnet. Zur Signifikanzprüfung wurde eine einfaktorielle ANOVA durchgeführt. Ergänzend wurde eine lineare Regression für die abhängigen Variablen postoperativer AOFAS-Score, postoperativer Spitzendruck und postoperatives Kraft-Zeit-Integral in den Bereichen medialer, zentraler und lateraler Vorfuß durchgeführt. Als potentielle Prädiktoren wurden dabei berücksichtigt: Alter, Gewicht, rheumatoide Arthritis (ja /nein), Auftreten von floating toes (ja /nein), knöchernen Kleinzehenoperationen, definiert durch PIP-Arthrodesen oder Basisosteotomie (ja/nein), Prozedur am ersten Strahl, bestehend aus Lapidusarthrodesen, Cheilektomie, Chevron-Osteotomie oder Austin-Osteotomie (ja/nein), Operationsmethode (Weil-Osteotomie/DMMO), präoperativer Ausgangswert, postoperativer HVA und postoperativer IMA. Die Auswahl der Variablen erfolgte mittels Rückwärts-Selektion, wobei Variablen, für deren F-Wert die Wahrscheinlichkeit größer gleich 0,1 war, aus dem Modell entfernt wurden. Die Variablen Operationsmethode, präoperativer Ausgangswert und Prozedur am ersten Strahl wurden unabhängig davon immer ins Modell eingeschlossen. Mittels Streudiagramm wurde sichergestellt, dass ein linearer Zusammenhang bestand und keine Heteroskedasität oder Autokorrelation der Residuen vorlag. Weiterhin wurde eine Multikollinearität der unabhängigen Variablen ausgeschlossen und die Residuen hinsichtlich des Vorliegens einer Normalverteilung geprüft.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Allgemeine Patientendaten

Unter Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien wurden zwei Untersuchungsgruppen gebildet, welche in Tabelle 1 genauer aufgeschlüsselt sind.

In Gruppe 1 waren 4 Patienten (4 Füße), in Gruppe 2 waren 14 Patienten (15 Füße) an rheumatoider Arthritis erkrankt. Die Anzahl der operierten Strahlen ist aus Tabelle 2 ersichtlich.

**Tabelle 1:** Gruppendaten

	Gruppe 1 (Weil-Osteotomie)	Gruppe 2 (DMMO)
Patientenanzahl	36	41
Männlich	7	10
Weiblich	29	31
Füße gesamt	40	44
Rechts	18	22
Links	22	22
Alter (zum OP-Zeitpunkt)	57,3 (SD = 13,29)	65,3 (SD = 9,25)
Min	23	47,3
Max	78	80,2
Gewicht (kg)	73,0 (SD = 14,94)	75,3 (SD = 13,92)
Min	47	48
Max	125	119
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	25,6 (SD = 4,76)	26,6 (SD = 4,45)
Min	19,5	18,1
Max	44,3	41,2

Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 2:** Anzahl der operierten Strahlen

	MT-II	MT-III	MT-IV	MT-V
Gruppe 1 (Weil)	40	19	8	0
Gruppe 2 (DMMO)	40	38	38	35

Quelle: eigene Darstellung

### 4.2 Zusätzliche operative Eingriffe

Zusätzlich zur geplanten Weil-Osteotomie bzw. DMMO machte die individuelle Vorfußdeformität des Patienten es bisweilen nötig, weitere korrektive Eingriffe vorzunehmen, um ein optimales Vorfußalignment und Korrekturergebnis zu erzielen, dies zeigt Tabelle 3. Die perkutane Krallenzehkorrektur beinhaltet dabei die Basisosteotomie des Grundglieds, die Tenotomie der langen Extensorsehnen sowie die Tenotomie der kurzen Flexoren.

**Tabelle 3:** Anzahl zusätzlich durchgeführter operativer Eingriffe

	Gruppe 1 (Weil)	Gruppe 2 (DMMO)
Modifizierte Lapidus-Arthrodese	28	14
(Austin-) Chevron-Osteotomie	4	3
MICA	0	2
Scarf-Osteotomie	2	1
Open-Wedge-Osteotomie	0	2
Cheilektomie	4	3
MTP-1 Arthrodese	4	12
Akin-Osteotomie	15	14
PIP-Arthrodese	15	3
perkutane Krallenzehengericht	9	40
distale Weichteilprozedur	18	6

Quelle: eigene Darstellung

#### 4.3 Aufgetretene unerwünschte Ereignisse

Die Anzahl, der aufgetretenen, vorab definierten unerwünschten Ereignisse ist in Tabelle 4 dargestellt.

Es bestanden signifikante Unterschiede in Bezug auf die Häufigkeit von Wundheilungsstörungen. In Gruppe 1 wurden in zwei Fällen Wundinfektionen im Bereich der Weil-Osteotomie beobachtet. In beiden Fällen war die Resektion der osteotomierten Köpfchen notwendig. In drei Fällen kam es bei gleichzeitiger Korrektur des ersten Strahls zu Wundinfektionen in diesem Bereich. Vier der Betroffenen waren Raucher, bei drei Patienten lag ein Diabetes mellitus vor. Bei drei Patienten war eine operative Wundspülung und -revision erforderlich. Es wurden drei

**Tabelle 4:** Anzahl aufgetretener unerwünschter Ereignisse

	Gruppe 1 (Weil)	Gruppe 2 (DMMO)
Wundheilungsstörung	4*	0*
Infektion	5	1
Pseudoarthrose	0	0
Materialkonflikt	2	0
Transfermetatarsalgie	1	1
Floating toes	25	21
Knochenheilungsdauer	6 Wochen	8-12 Wochen

signifikant zu \*  $p < 0,05$

Quelle: eigene Darstellung



Pin-Infekte nach PIP-Arthrodeese in Gruppe 1 beobachtet, die nach Entfernung folgenlos ausheilten. In Gruppe 2 wurde eine Wundinfektion beobachtet, welche konservativ therapiert werden konnte.

In zwei Fällen in Gruppe 1 bestand ein Impingement im MTP-Gelenk durch das eingesetzte Osteosynthesematerial. Postoperativ wurde nach einem Jahr die Indikation zur Entfernung der OP-Schraube gestellt. Floating toes wurden in 25 Fällen (63 %) aus Gruppe 1 bzw. 21 Fällen (48 %) aus Gruppe 2 beobachtet. Dieser Unterschied war nicht signifikant. Die Knochenheilung war in Gruppe 1 nach durchschnittlich sechs Wochen abgeschlossen, bei Gruppe 2 betrug die Zeitdauer zwischen acht und zwölf Wochen.

#### 4.4 AOFAS-Score

Zunächst wurden vergleichend der Mittelwert des AOFAS-Scores jeweils prä- und ein Jahr postoperativ untersucht (vgl. Abbildung 10). In Gruppe 1 betrug dieser Wert präoperativ 60 ( $SD = 10,25$ ) Punkte. Postoperativ stieg der mittlere AOFAS-Score auf 81 Punkte ( $SD = 12,14$ ) an. Im Vergleich dazu lag der Mittelwert in Gruppe 2 präoperativ bei 51 Punkten ( $SD = 11,54$ ) und postoperativ bei 72 Punkten ( $SD = 17,89$ ). Der Unterschied zwischen prä- und postoperativen Werten war in beiden Gruppen signifikant ( $p = 0,001$  bzw.  $p = 0,001$ ). Die präoperativen Ausgangswerte unterschieden sich ebenfalls signifikant zwischen beiden Gruppen ( $p = 0,002$ ). Der Vergleich der postoperativen Werte beider Gruppen zeigte keinen signifikanten Unterschied.

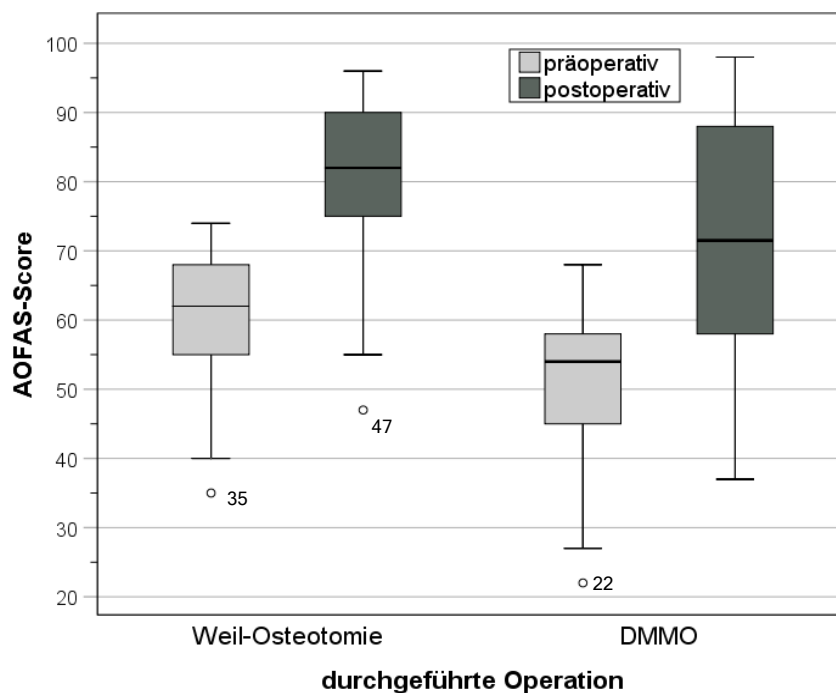
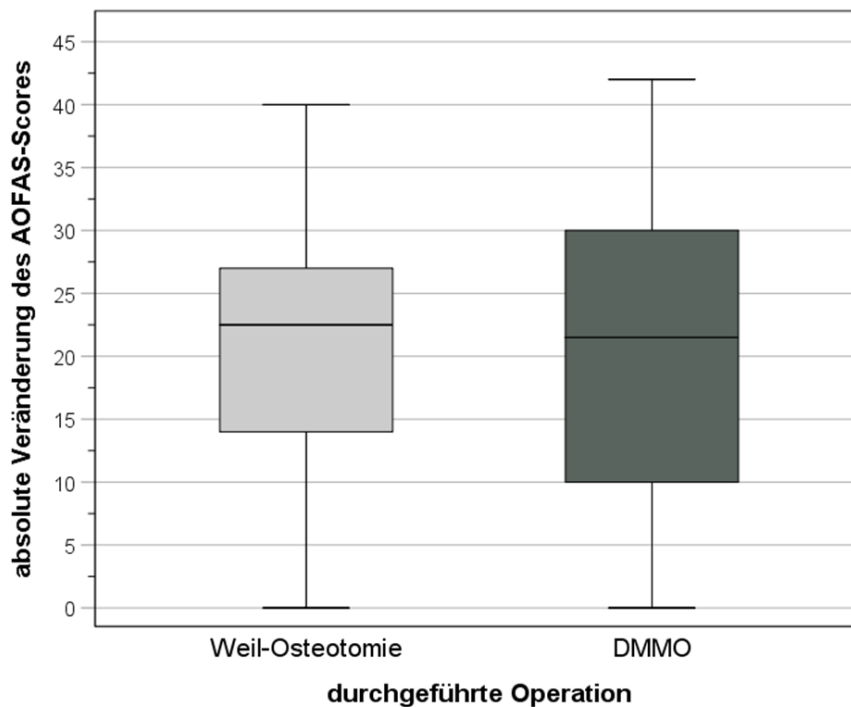


Abbildung 10: prä- und postoperativer AOFAS-Score

Quelle: eigene Darstellung

Zusätzlich wurde die absolute Veränderung des AOFAS-Scores berechnet (vgl. Abbildung 11), welcher für Gruppe 1 im Mittel um 21 Punkte ( $SD = 9,74$ ) stieg. Der maximale Anstieg betrug 40 Punkte.

In Gruppe 2 wurde ein mittlerer Anstieg des AOFAS-Scores von 21 Punkten ( $SD = 12,50$ ) beobachtet. Der maximale Anstieg betrug 42 Punkte. In Bezug auf die absolute Veränderung konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden.



**Abbildung 11:** absolute Veränderung des AOFAS-Scores bei Weil-Osteotomie und DMMO

Quelle: eigene Darstellung

Zur genaueren Analyse wurde eine lineare Regression durchgeführt. Dabei wurde der postoperative AOFAS-Score in Abhängigkeit von der gewählten Operationsmethode untersucht (vgl. Tabelle 5). Als Kovariablen wurden knöchernen Kleinzehenoperationen und Prozeduren am ersten Strahl, das Patientenalter zum Operationszeitpunkt, rheumatoide Arthritis sowie der präoperative Ausgangswert berücksichtigt.  $R^2$  betrug 0,476, das korrigierte  $R^2$  0,351,  $F(df = 6;25) = 3,788$ . Das Modell war signifikant ( $p = 0,008$ ). Von den berücksichtigten Kovariablen wies lediglich der präoperative Ausgangswert ( $\beta = 0,405$ ,  $p = 0,018$ ) einen signifikanten Einfluss auf den postoperativen AOFAS-Score auf. Die gewählte Operationsmethode ( $\beta = -0,472$ ,  $p = 0,238$ ) hatte keinen signifikanten Einfluss auf den postoperativen AOFAS-Score.

**Tabelle 5:** Lineare Regression des postoperativen AOFAS-Scores in Abhängigkeit der gewählten Operationsmethode

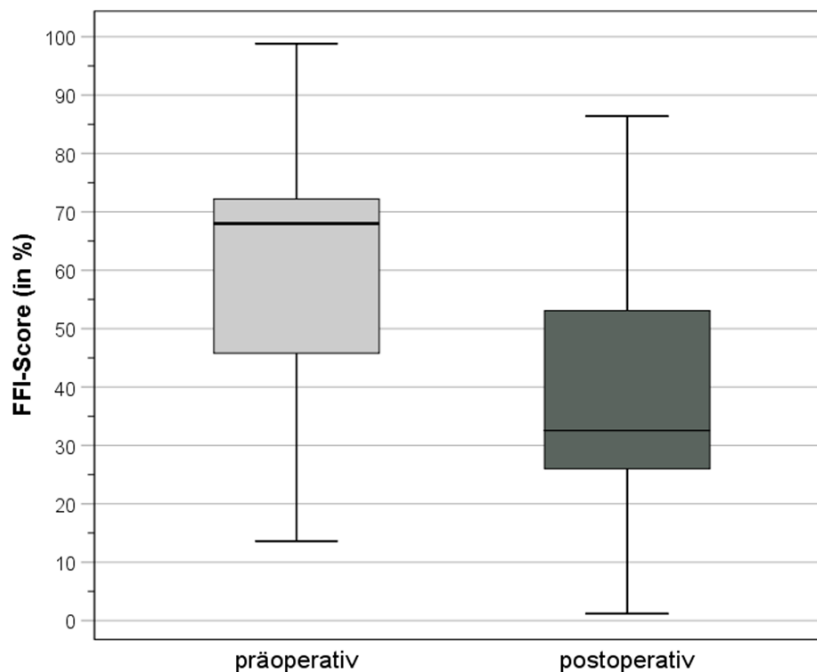
Variable	Postoperativer AOFAS-Score			
	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	70,711**	18,694		0,001
Operation	-12,804	10,583	-0,472	0,238
Kleinzeheoperation	6,952	7,537	0,261	0,365
Prozedur am 1. Strahl	-1,356	6,376	-0,051	0,833
Alter in Jahren	-0,374	0,205	-0,302	0,079
Rheuma	1,764	5,944	0,048	0,769
Präop. AOFAS-Score	0,459*	0,181	0,405*	0,018
R <sup>2</sup>	0,476			
Korrigiertes R <sup>2</sup>	0,351			
F (df = 6;25)	3,788**			

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$

Quelle: eigene Darstellung

#### 4.5 FFI-Score

In Abbildung 12 ist der FFI-Score in Gruppe 2 jeweils prä- und postoperativ dargestellt.



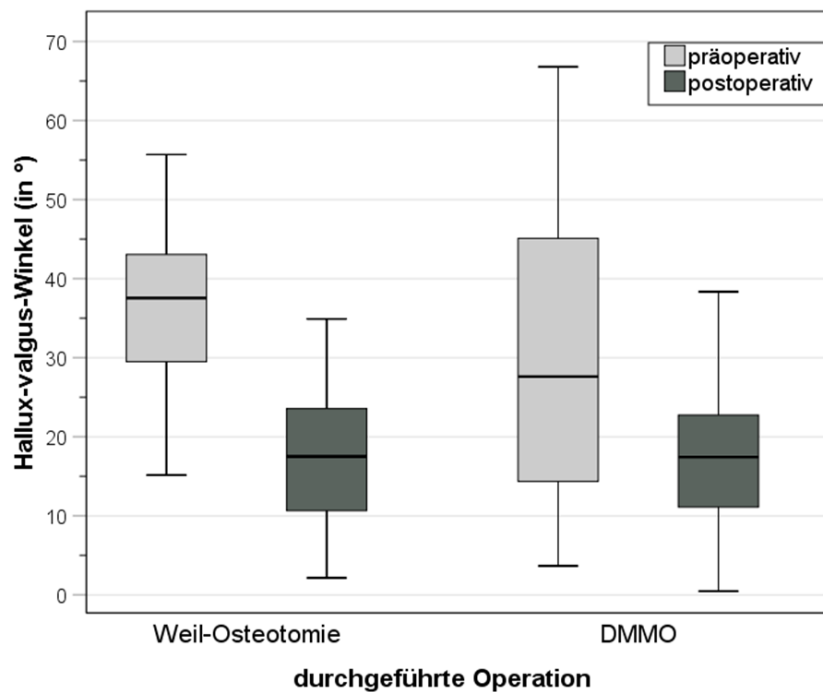
**Abbildung 12:** prä- und postoperativer FFI-Score bei DMMO

Quelle: eigene Darstellung

Im Mittel betrug der FFI-Score 60,18 % ( $SD = 20,79$ ) präoperativ bzw. 36,20 % ( $SD = 18,96$ ) postoperativ. Dieser Unterschied war signifikant ( $p < 0,001$ ). Die absolute Reduktion des Scores betrug im Durchschnitt 23,97 Prozentpunkte ( $SD = 23,57$ )

#### 4.6 Radiologische Ergebnisse

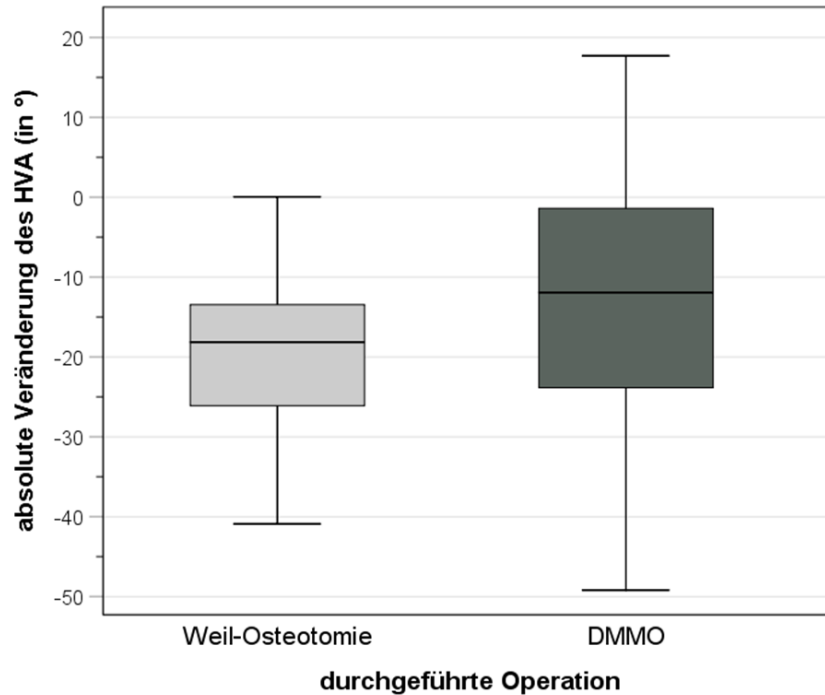
Die Unterschiede zwischen prä- und postoperativem Hallux-valgus-Winkel werden aus Abbildung 13 ersichtlich. Der HVA betrug in Gruppe 1 präoperativ im Mittel  $36,15^\circ$  ( $SD = 10,08$ ). 12 Monate postoperativ lag der Mittelwert bei  $16,97^\circ$  ( $SD = 9,25$ ). In Gruppe 2 betrug der HVA präoperativ im Durchschnitt  $30,57^\circ$  ( $SD = 18,13$ ), postoperativ  $17,24^\circ$  ( $SD = 10,0$ ). Die Unterschiede zwischen präoperativen und postoperativen Werten waren in beiden Gruppen statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ). Hingegen konnte kein signifikanter Unterschied beim Vergleich der postoperativen Werte beider Gruppen festgestellt werden.



**Abbildung 13:** prä- und postoperativer Hallux-valgus-Winkel bei Weil-Osteotomie und DMMO

Quelle: eigene Darstellung

Die errechnete absolute Veränderung des HVA (vgl. Abbildung 14) ergab für Patienten, die eine Weil-Osteotomie erhalten hatten, im Mittel eine Reduktion um  $19,19^\circ$  ( $SD = 10,94$ ) bezogen auf den Ausgangswert. Die absolute Veränderung des HVA von prä- zu postoperativ betrug bei DMMO-Patienten durchschnittlich  $-13,33^\circ$  ( $SD = 16,13$ ). Der Vergleich beider Gruppen zeigte keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der absoluten Veränderung des HVA.

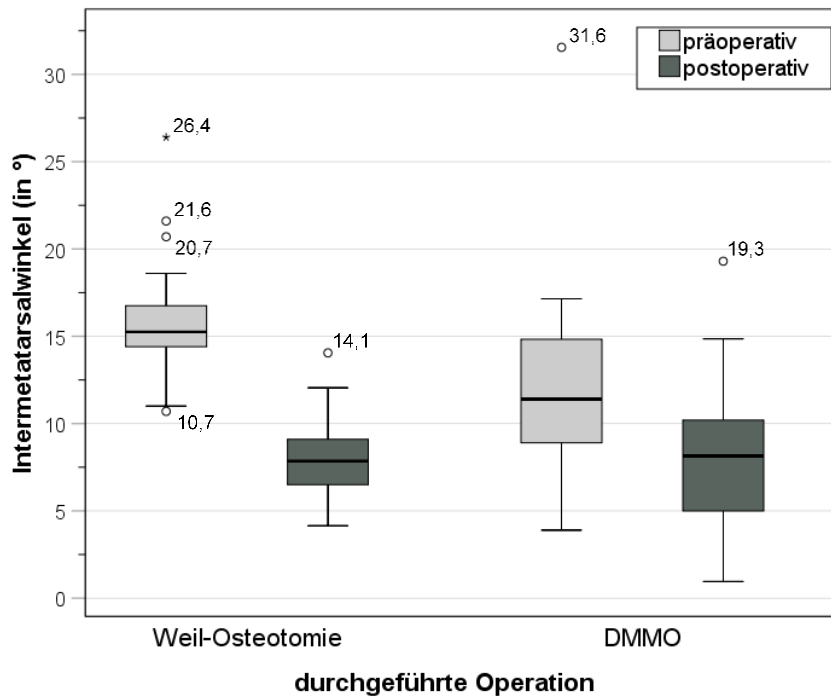


**Abbildung 14:** absolute Veränderung des Hallux-valgus-Winkels bei Weil-Osteotomie und DMMO  
Quelle: eigene Darstellung

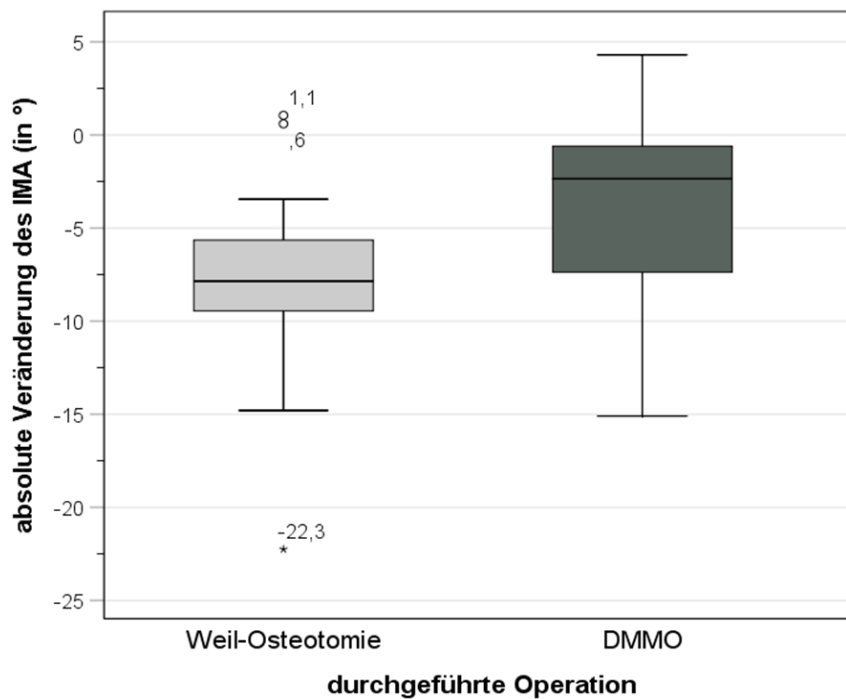
Abbildung 15 zeigt die Unterschiede zwischen prä- und postoperativen Intermetarsalwinkeln beider Gruppen. Der IMA lag in Gruppe 1 präoperativ im Durchschnitt bei  $15,97^\circ$  ( $SD = 3,61$ ), postoperativ hingegen bei  $8,1^\circ$  ( $SD = 2,53$ ). In Gruppe 2 betrug der durchschnittliche IMA präoperativ  $12,36^\circ$  ( $SD = 5,08$ ) und  $8,41^\circ$  ( $SD = 4,20$ ) postoperativ. Diese Veränderungen waren in beiden Gruppen statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ). Es bestand ein signifikanter Unterschied zwischen den präoperativen Mittelwerten ( $p = 0,001$ ). Die postoperativen Mittelwerte beider Gruppen unterschieden sich nicht signifikant.

In Hinblick auf die absolute Veränderung des IMA (vgl. Abbildung 16) konnte ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen festgestellt werden ( $p = 0,008$  bzw.  $p = 0,026$ ). Es ergab sich im Mittel in Gruppe 1 eine absolute Reduktion um  $7,87^\circ$  ( $SD = 4,98$ ).

Die mittlere absolute Reduktion des IMA in Gruppe 2 betrug  $3,95^\circ$  ( $SD = 4,94$ ).



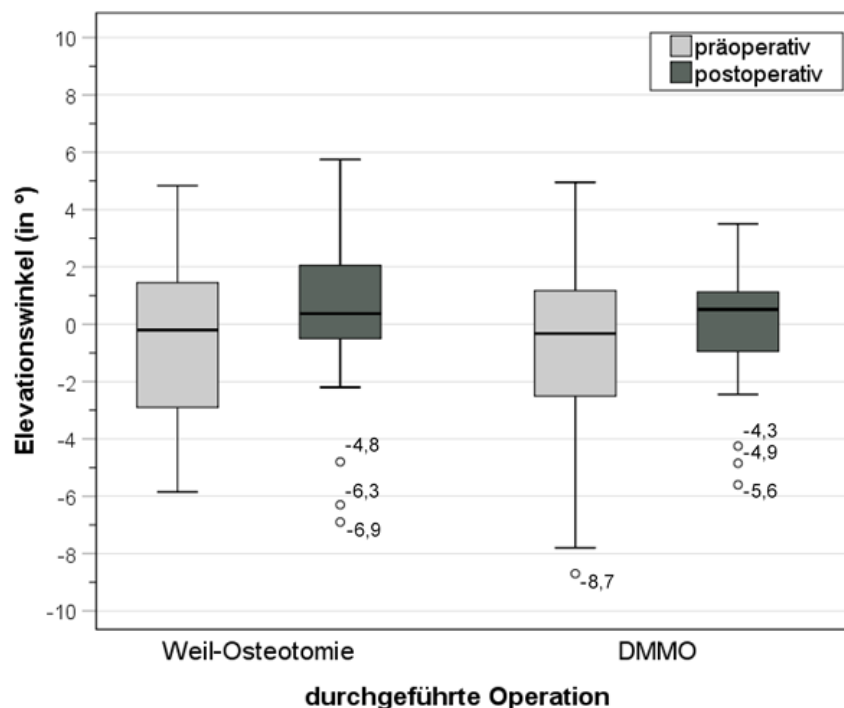
**Abbildung 15:** prä- und postoperativer Intermetatarsalwinkel bei Weil-Osteotomie und DMMO  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 16:** absolute Veränderung des Intermetatarsalwinkels bei Weil-Osteotomie und DMMO  
Quelle: eigene Darstellung

Als drittes radiologisches Maß wurde der Elevationswinkel bestimmt (vgl. Abbildung 17). Präoperativ betrug dieser in Gruppe 1 durchschnittlich  $-0,44^\circ$  ( $SD = 3,09$ ) (Median:  $-0,2^\circ$ ). Ein Jahr postoperativ wurde im Mittel ein Elevationswinkel von  $0,13^\circ$  ( $SD = 3,10$ ) gemessen (Median:  $0,37^\circ$ ). In Gruppe 2 konnte präoperativ ein durchschnittlicher Elevationswinkel von  $-1^\circ$  ( $SD = 3,39$ ) festgestellt werden (Median:  $-0,33^\circ$ ). Postoperativ betrug dieser  $-0,07^\circ$  ( $SD = 2,20$ ) (Median:  $-0,52^\circ$ ).

Zur genaueren Darstellung wurde betrachtet, bei welcher Anzahl an Patienten vor bzw. nach der Operation ein positiver oder negativer Elevationswinkel vorlag (vgl. Tabelle 6). Dabei konnte festgestellt werden, dass in beiden Gruppen der größte Anteil der Patienten sowohl prä- als auch postoperativ einen positiven Winkel aufwies. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen in Bezug auf die Anzahl postoperativ positiver oder negativer Winkel gefunden werden. In beiden Gruppen gab es im Vergleich von prä- zu postoperativ keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit positiver oder negativer Winkel. Bei sieben Patienten konnte jeweils eine Veränderung eines initial negativen Winkels hin zu einem postoperativen positiven Wert beobachtet werden. Dieser Unterschied war in beiden Gruppen signifikant ( $p \leq 0,05$ ).



**Abbildung 17:** prä- und postoperativer Elevationswinkel bei Weil-Osteotomie und DMMO

Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 6:** prä- und postoperative Elevationswinkel

Gruppe 1		präoperativ	
postoperativ	Positiv	negativ	Gesamt
Positiv	8	7	15
	Präop.: 2,18° (SD = 1,77)	Präop.: -2,26° (SD = 1,67)	(MW = 1,63°
	Postop.: 0,77° (SD = 1,05)	Postop.: 2,49° (SD = 1,61)	SD = 1,57)
	Diff: -1,4° (SD = 2,23)	Diff: 4,75°* (SD = 1,76)	
negativ	2	4	6
	Präop.: 0,98° (SD = 0,46)	Präop.: -3,73° (SD = 1,54)	(MW = -3,62°
	Postop.: -4,55° (SD = 2,35)	Postop.: -3,15° (SD = 2,46)	SD = 2,51)
	Diff: -5,53° (SD = 1,88)	Diff: 0,58° (SD = 1,58)	
Gesamt	10	11	21
	(MW = 2,15° SD = 1,70)	(MW = -2,79° SD = 1,86)	
Gruppe 2		präoperativ	
postoperativ	Positiv	Negativ	
Positiv	11	7	18
	Präop.: 1,43° (SD = 1,65)	Präop.: -3,44° (SD = 2,62)	(MW = 1,19° SD
	Postop.: 0,72° (SD = 0,40)	Postop.: 1,82° (SD = 1,19)	0,95)
	Diff: -0,71° (SD = 1,77)	Diff: 5,27°* (SD = 3,53)	
Negativ	3	7	10
	Präop.: 1,12° (SD = 0,69)	Präop.: -3,61° (SD = 2,85)	(MW = 2,45° SD
	Postop.: -3,48° (SD = 1,50)	Postop.: -1,85° (SD = 1,76)	= 1,79)
	Diff: -4,6° (SD = 2,06)	Diff: 1,76° (SD = 3,08)	
Gesamt	14	14	28
	(MW = 1,47°, SD = 1,60)	(MW = -3,53°, SD = 2,77)	

signifikant zu \*  $p < 0,05$

Quelle: eigene Darstellung

#### 4.7 Maestro-Morphotypen

In beiden Gruppen wurde jeweils prä- und postoperativ der Morphotyp nach Maestro bestimmt. Dies ist in Tabelle 7 dargestellt.

Präoperativ zeigte sich in beiden Gruppen der M2M3 long Morphotyp nach Maestro als vorherrschend. Ein harmonischer Morphotyp war jeweils nur in drei Fällen gegeben. In Gruppe 1 zeigte sich in sechs Fällen, in Gruppe 2 in acht Fällen präoperativ eine Hypoplasie des vierten



und fünften Metatarsale bei entsprechender Überlänge von M2 und M3. In Gruppe 2 wurde präoperativ an sieben Füßen ein im Verhältnis zu M2 zu kurzes erstes Metatarsale beobachtet. Postoperativ blieb die Anzahl harmonischer Morphotypen in beiden Gruppen nahezu unverändert. Dazu traten in Gruppe 1 in fünf Fällen Vorfußalignments auf, welche sich nicht nach dem Schema von Maestro et al. zuordnen ließen. Bei drei Füßen bildete M3 als längstes Metatarsale den Scheitelpunkt der Metatarsalenparabel. In zwei Fällen zeigten die abschließenden Röntgenaufnahmen eine relative Überlänge des vierten Metatarsale.

**Tabelle 7:** Anzahl der Morphotypen nach Maestro

Morphotyp	Gruppe 1 (Weil)		Gruppe 2 (DMMO)	
	präoperativ	postoperativ	präoperativ	postoperativ
Harmonisch	3	2	3	4
M1 long	1	0	0	3
M1 short	1	1	7	3
M2M3 long	10	9	12	5
M4M5 Hypoplasie	6	4	8	15
M2 long	0	1	0	2
M2-M3 long	0	2	0	1
M2-M3 long, M2 long	6	0	8	11
M3 long	0	1	0	1
Nicht zuordenbar	0	5	0	0

Quelle: eigene Darstellung

Es bestanden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des präoperativen Auftretens einzelner Morphotypen zwischen den zwei Gruppen. In beiden Gruppen wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen prä- und postoperativem Morphotyp beobachtet (Gruppe 1:  $p = 0,035$ ; Gruppe 2:  $p = 0,018$ ). Dieser Zusammenhang war stark (Gruppe 1:  $r = 0,586$ ;  $p = 0,328$ ; Gruppe 2:  $r = 0,604$ ;  $p = 0,037$ ). Zudem bestand ein signifikanter Unterschied in der Häufigkeit der verschiedenen postoperativen Morphotypen zwischen beiden Operationsmethoden ( $p = 0,001$ ). Dieser beruhte auf signifikanten Unterschieden in der Häufigkeit des postoperativen Morphotyps M4M5 Hypoplasie bei M2M3M2 long Konfiguration ( $p = 0,001$ ) sowie auf signifikanten Häufigkeitsunterschieden für nicht zuordenbare Morphotypen ( $p = 0,009$ ). Für die restlichen Morphotypen bestanden keine signifikanten Häufigkeitsunterschiede postoperativ zwischen Gruppe 1 und 2. Der Zusammenhang zwischen durchgeführter Operationsmethode und postoperativem Morphotyp war stark ( $r = 0,650$ ;  $p = 0,001$ ).

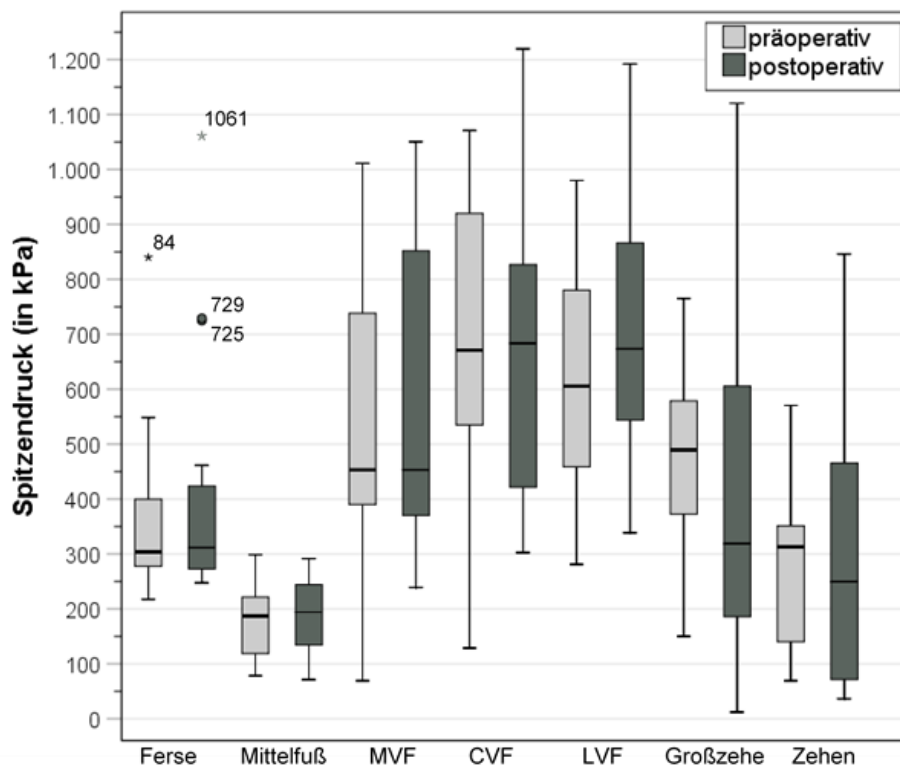
## 4.8 Pedobarografie

### 4.8.1 Spitzendruck

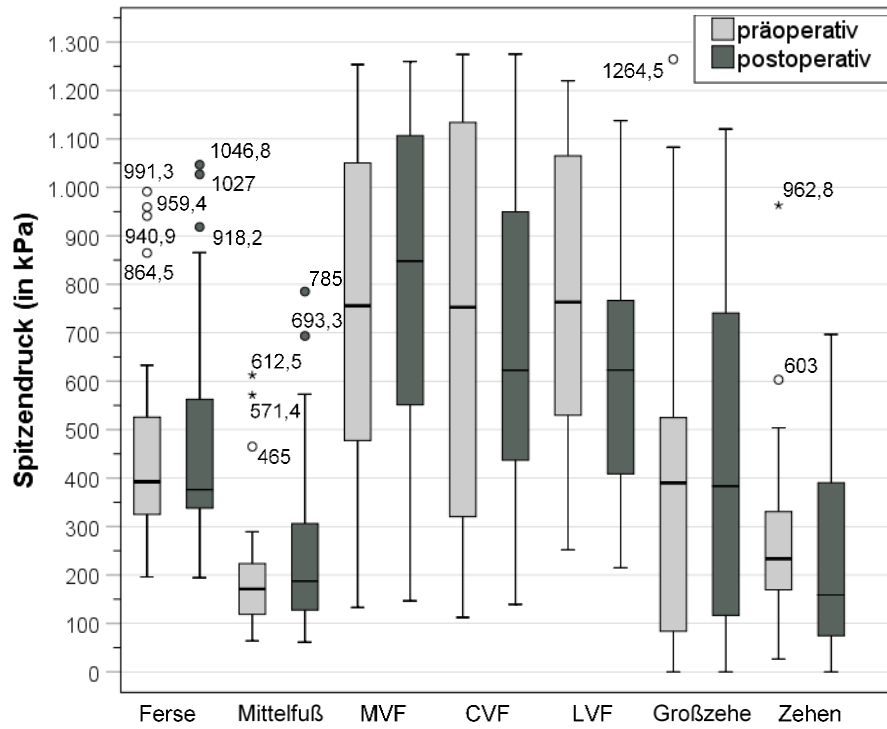
Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Spitzendrücke in Gruppe 1 jeweils präoperativ und ein Jahr postoperativ. In keinem Areal bestanden signifikante Unterschiede zwischen präoperativ und ein Jahr postoperativ gemessenen Spitzendrücken.

Die prä- und postoperativen Spitzendrücke in Gruppe 2 sind in Abbildung 19 dargestellt. In Gruppe 2 konnte im Bereich des Mittelfußes eine signifikante Zunahme des Spitzendruckes von 207,91 kPa ( $SD = 133,44$ ) präoperativ auf 255,38 kPa ( $SD = 184,73$ ) postoperativ ( $p = 0,020$ ) verzeichnet werden. Im Gebiet des lateralen Vorfußes wurde eine signifikante Reduktion des Spitzendruckes von 802,76 kPa ( $SD = 298,15$ ) auf 610,48 kPa ( $SD = 263,94$ ) ( $p = 0,001$ ) beobachtet. In allen weiteren Fußarealen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen prä- und postoperativen Werten. Beim Vergleich beider Gruppen hinsichtlich des ein Jahr postoperativen Spitzendruckes ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

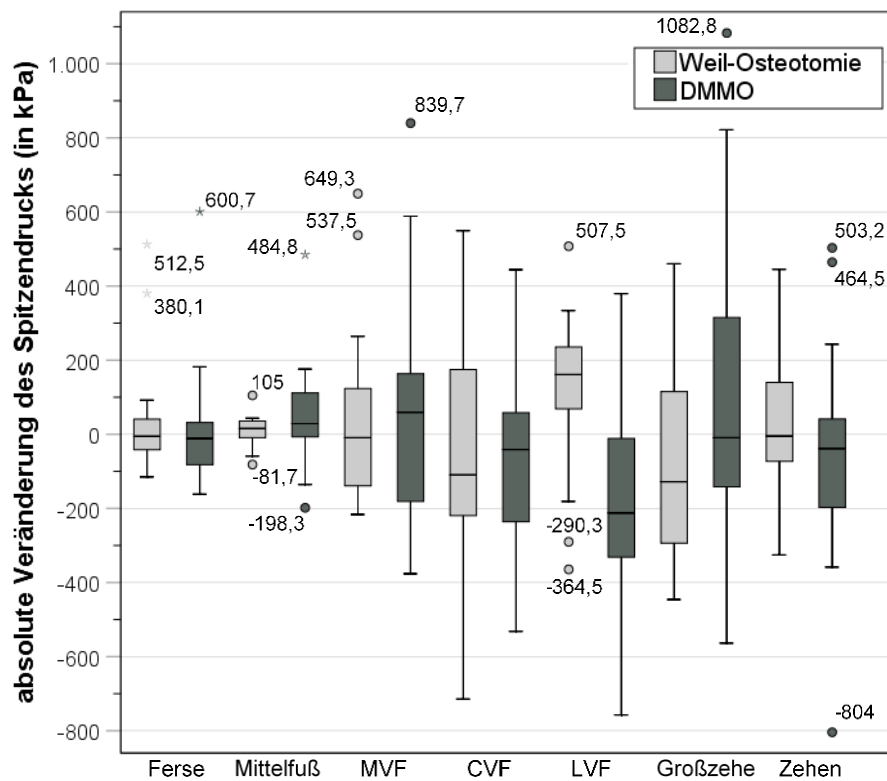
Bei Betrachtung der absoluten Veränderung des Spitzendruckes (vgl. Abbildung 20) konnte nur im Bereich des lateralen Vorfußes ein signifikanter Unterschied ( $p < 0,001$ ) festgestellt werden. Der Spitzendruck in diesem Gebiet nahm in Gruppe 1 im Mittel um 100,65 kPa ( $SD = 216,51$ ) zu, in Gruppe 2 hingegen um durchschnittlich 192,29 kPa ( $SD = 257,79$ ) ab.



**Abbildung 18:** prä- und postoperativer Spitzendruck bei Weil-Osteotomie  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 19:** prä- und postoperativer Spitzendruck bei DMMO  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 20:** absolute Veränderung des Spitzendrucks bei Weil-Osteotomie und DMMO  
Quelle: eigene Darstellung

Es zeigte sich, dass eine signifikante Korrelation zwischen dem Auftreten von floating toes und dem postoperativen Spitzendruck im Bereich der Kleinzehen bestand ( $r = 0,396$ ;  $p = 0,006$ ). Dabei betrug der postoperative Spitzendruck ohne floating toes im Mittel 366,53 kPa ( $SD = 228,62$ ) mit floating toes hingegen 185,95 kPa ( $SD = 191,73$ ) ( $p = 0,005$ ). Im Rest des Fußes bedingte das Auftreten von floating toes keine signifikanten Unterschiede des postoperativen Spitzendrucks.

Weiterhin wurde eine lineare Regression bezüglich des postoperativen Spitzendruckes in den Gebieten des medialen, zentralen und lateralen Vorfußes durchgeführt. Dabei konnte für verschiedene Kovariablen adjustiert werden, die Einfluss auf das Ergebnis haben könnten. Als Einflussfaktoren wurden die Operationsmethode, der präoperative Ausgangswert sowie Prozeduren am ersten Strahl berücksichtigt. Zusätzlich wurden noch der Einfluss von floating toes, des Gewichts und rheumatoider Arthritis berücksichtigt, sofern diese die Güte des Modells beeinflussten.

Tabelle 8 gibt die Ergebnisse der linearen Regression für den postoperativen Spitzendruck im Bereich des medialen Vorfußes in Abhängigkeit von der gewählten Operationsmethode unter Berücksichtigung der o. g. Kofaktoren wieder.

**Tabelle 8:** Lineare Regression des postoperativen Spitzendrucks (medialer Vorfuß)

Postoperativer Spitzendruck (medialer Vorfuß)				
Variable	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	-380,417	204,143		0,070
Operation	230,465*	84,999	0,334**	0,010
Floating toes	183,696*	75,095	0,259*	0,019
Prozedur am 1. Strahl	258,514**	82,081	0,372**	0,003
Präop. Spitzendruck (MVF)	0,637***	0,117	0,573***	< 0,001
Gewicht	3,803	2,208	0,180	0,092
$R^2$	0,616			
Korr. $R^2$	0,568			
F (df = 5;40)	12,842***			< 0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$  Quelle: eigene Darstellung

$R^2$  betrug 0,616, das korrigierte  $R^2$  0,568,  $F$  (df = 5;40) = 12,842. Das Modell ist signifikant ( $p < 0,001$ ). Die gewählte Operationsmethode ( $\beta = 0,334$ ,  $p = 0,010$ ) hatte einen signifikanten Einfluss auf den postoperativen Spitzendruck. Dabei war dieser in Gruppe 2 um 230,465 kPa

höher als in Gruppe 1. Weiterhin signifikanten Einfluss auf den postoperativen Spitzendruck hatte das postoperative Auftreten von floating toes ( $\beta = 0,259, p = 0,019$ ), wobei beim Vorliegen von floating toes der Spitzendruck 183,696 kPa höher war. Prozeduren am ersten Strahl hatten ebenfalls signifikante Auswirkungen auf den Spitzendruck ( $\beta = 0,372, p = 0,003$ ). Dabei zeigte sich nach Operation am ersten Strahl ein um 258,514 kPa höherer Spitzendruck.

Die Ergebnisse der linearen Regression für den postoperativen Spitzendruck in Abhängigkeit von der gewählten Operationsmethode unter Berücksichtigung des präoperativen Ausgangswerts, dem Auftreten von floating toes sowie durchgeführter Prozeduren am ersten Strahl für den zentralen Vorfuß zeigt Tabelle 9.  $R^2$  betrug 0,440, das korrigierte  $R^2$  0,385,  $F (df = 4;41) = 8,050$ . Das Modell ist signifikant ( $p < 0,001$ ). Der präoperative Ausgangswert zeigte als einzige Variable signifikanten Einfluss ( $\beta = 0,648, p < 0,001$ ). Die Operation hatte keine signifikanten Auswirkungen auf den postoperativen Spitzendruck.

**Tabelle 9:** Lineare Regression des postoperativen Spitzendrucks (zentraler Vorfuß)

Variable	Postoperativer Spitzendruck (zentraler Vorfuß)			
	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	216,309	121,590		0,083
Operation	-25,665	87,245	-0,042	0,770
Floating toes	113,567	72,909	0,182	0,127
Prozedur am 1. Strahl	-30,490	87,505	-0,05	0,729
Präop. Spitzendruck (CVF)	0,575***	0,106	0,648***	< 0,001
$R^2$	0,440			
Korr. $R^2$	0,385			
$F (df = 4; 41)$	8,050***			< 0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$

Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 10 ist das Ergebnis der linearen Regression des postoperativen Spitzendrucks für den lateralen Vorfuß dargestellt. Als Kovariablen wurden dabei die Operationsmethode, der präoperative Ausgangswert, Prozeduren am 1. Strahl sowie rheumatoide Arthritis berücksichtigt.  $R^2$  betrug 0,469, das korrigierte  $R^2$  0,410,  $F (df = 4;36) = 7,943$ . Das Modell ist signifikant ( $p < 0,001$ ). Die gewählte Operationsmethode hatte keinen signifikanten Effekt auf den postoperativen Spitzendruck. Lediglich der präoperative Ausgangswert wies einen signifikanten Einfluss auf ( $\beta = 0,649, p < 0,001$ ).

**Tabelle 10:** Lineare Regression des postoperativen Spitzendrucks (lateral Vorfuß)

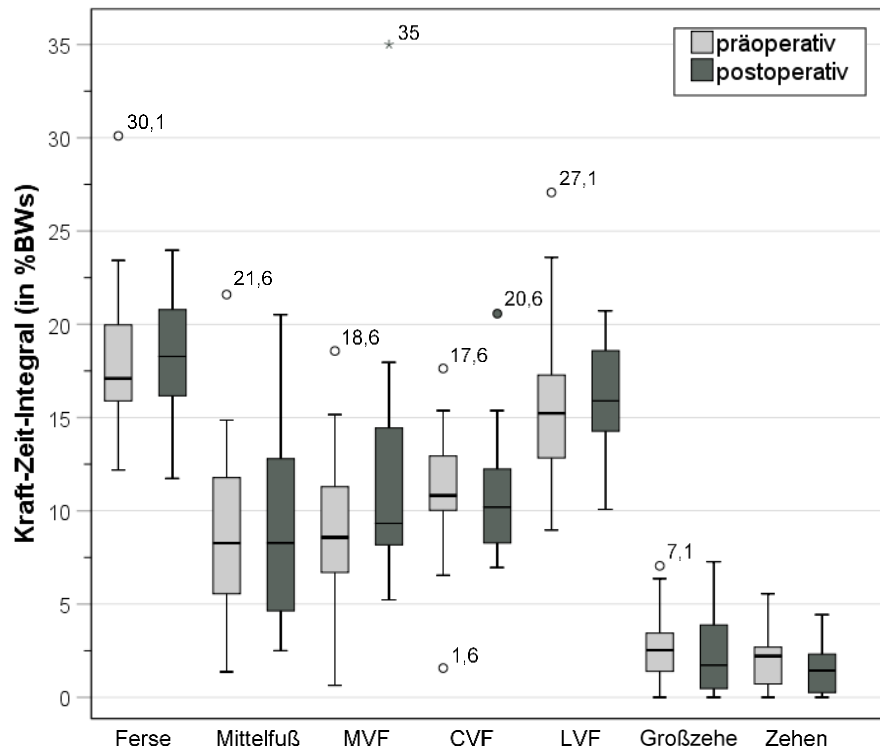
Variable	Postoperativer Spitzendruck (lateral Vorfuß)			
	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	283,818*	110,113		0,014
Operation	-134,680	94,964	-0,521	0,165
Prozedur am 1. Strahl	71,637	83,642	0,129	0,397
Rheumatoide Arthritis	-113,416	92,477	-0,169	0,228
Präop. Spitzendruck (LVF)	0,594***	0,120	0,649***	< 0,001
R <sup>2</sup>	0,469			
Korr. R <sup>2</sup>	0,410			
F (df = 4; 36)	7,943***			< 0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$  Quelle: eigene Darstellung

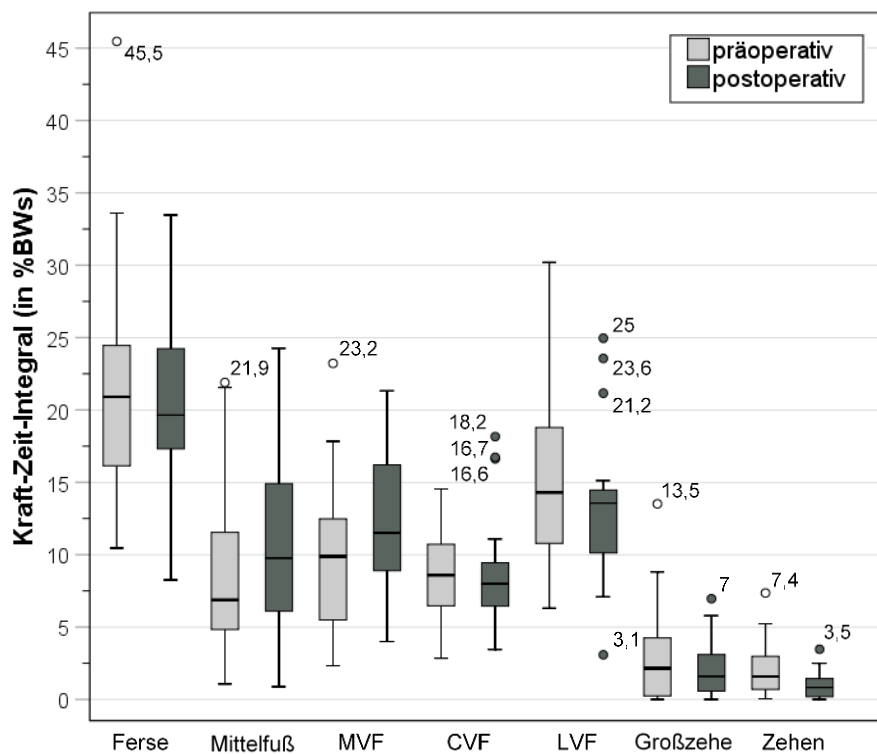
#### 4.8.2 Kraft-Zeit-Integral

Die Unterschiede zwischen präoperativ und ein Jahr postoperativ gemessenem Kraft-Zeit-Integral in Gruppe 1 sind aus Abbildung 21 ersichtlich. Es zeigten sich signifikante Veränderungen im Bereich des medialen Vorfußes sowie der Kleinzehen. Im Gebiet des medialen Vorfußes wurde eine Zunahme des Kraft-Zeit-Integrals von 9,05 %BWs ( $SD = 3,87$ ) auf 11,78 %BWs ( $SD = 6,36$ ) ( $p = 0,021$ ) beobachtet. Im Bereich der Kleinzehen nahm das Kraft-Zeit-Integral von 2,09 %BWs ( $SD = 1,56$ ) präoperativ auf 1,57 %BWs ( $SD = 1,37$ ) postoperativ ab ( $p = 0,049$ ).

Den Vergleich von prä- und postoperativem Kraft-Zeit-Integral in Gruppe 2 zeigt Abbildung 22. Hier konnte im Bereich des Mittelfußes eine signifikante Zunahme des Kraft-Zeit-Integrals von 8,94 %BWs ( $SD = 5,77$ ) präoperativ auf 10,84 %BWs ( $SD = 6,73$ ) postoperativ verzeichnet werden ( $p = 0,011$ ). Im Gebiet des medialen Vorfußes wurde eine signifikante Zunahme von 9,89 %BWs ( $SD = 4,77$ ) auf 12,38 %BWs ( $SD = 4,92$ ) gemessen ( $p = 0,035$ ). Eine signifikante Reduktion des Kraft-Zeit-Integrals von 14,87 %BWs ( $SD = 5,75$ ) auf 12,92 %BWs ( $SD = 4,69$ ) zeigte sich im Bereich des lateralen Vorfußes ( $p = 0,041$ ). Im Gebiet der Kleinzehen ergab sich eine signifikante Abnahme des Kraft-Zeit-Integrals von präoperativ 2,0 %BWs ( $SD = 1,74$ ) auf 0,97 %BWs ( $SD = 0,90$ ) ( $p = 0,001$ ) postoperativ.



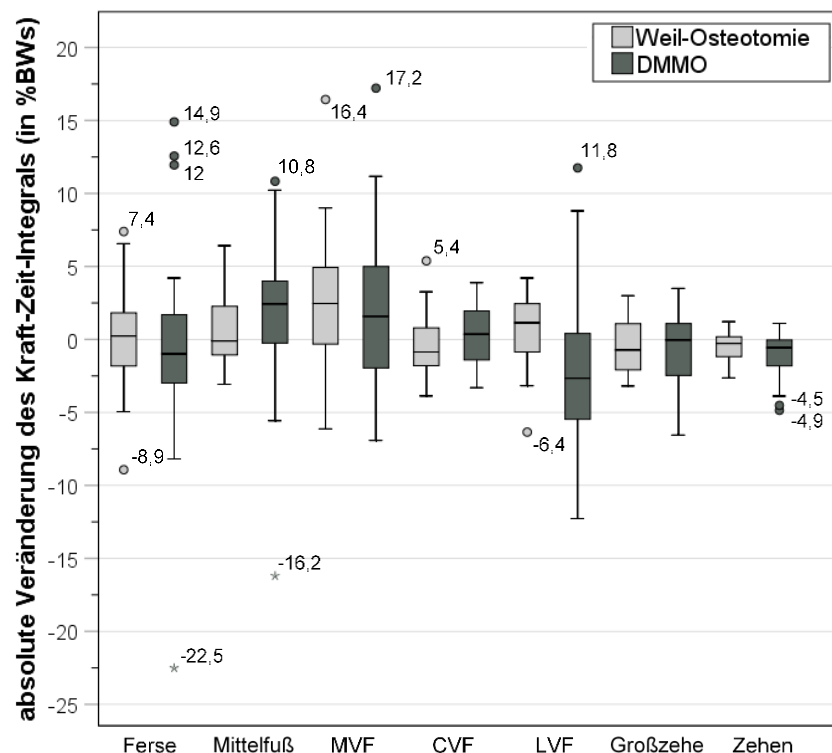
**Abbildung 21:** prä- und postoperatives Kraft-Zeit-Integral bei Weil-Osteotomie  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 22:** prä- und postoperatives Kraft-Zeit-Integral bei DMMO  
Quelle: eigene Darstellung

Der Vergleich beider Gruppen hinsichtlich des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals erbrachte signifikant niedrigere postoperative Werte im Bereich des zentralen Vorfußes in Gruppe 2 ( $MW = 8,67 \%BW_s$ ;  $SD = 3,48$ ) gegenüber Gruppe 1 ( $MW = 10,73 \%BW_s$ ;  $SD = 3,20$ ) ( $p = 0,013$ ). Dasselbe galt für den lateralen Vorfuß – auch hier wies Gruppe 2 ( $MW = 12,92 \%BW_s$ ;  $SD = 4,69$ ) signifikant niedrigere Mittelwerte auf als Gruppe 1 ( $MW = 16,10 \%BW_s$ ;  $SD = 2,85$ ) ( $p = 0,002$ ). Die Betrachtung der absoluten Veränderung des Kraft-Zeit-Integrals (vgl. Abbildung 23) zeigte signifikante Unterschiede im Bereich des lateralen Vorfußes ( $p = 0,033$ ). In Gruppe 1 wurde eine Zunahme des Kraft-Zeit-Integrals um im Mittel  $0,60 \%BW_s$  ( $SD = 2,59$ ), in Gruppe 2 eine Abnahme um  $1,96 \%BW_s$  ( $SD = 5,18$ ) beobachtet. Alle anderen Areale wiesen keine signifikanten Unterschiede auf.

Im Bereich der Kleinzehen fiel ein deutlicher Zusammenhang zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und dem Auftreten von floating toes auf ( $r = 0,366$ ;  $p = 0,011$ ). Das postoperative Kraft-Zeit-Integral lag bei Fällen ohne floating toes im Mittel bei  $1,79 \%BW_s$  ( $SD = 1,29$ ) bzw. mit floating toes bei  $0,91 \%BW_s$  ( $SD = 1,00$ ) ( $p = 0,010$ ). Für den übrigen Fuß bestand kein Zusammenhang zwischen dem postoperativen Kraft-Zeit-Integral und dem Auftreten von floating toes.



**Abbildung 23:** absolute Veränderung des Kraft-Zeit-Integrals bei Weil-Osteotomie und DMMO  
Quelle: eigene Darstellung



Zur weiteren Analyse wurde eine lineare Regression durchgeführt hinsichtlich des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals in den Gebieten des medialen, zentralen und lateralen Vorfußes. Dabei wurden als Einflussfaktoren die Operationsmethode, der präoperative Ausgangswert sowie Prozeduren am ersten Strahl berücksichtigt. Des Weiteren wurden in einigen Fällen das Auftreten von floating toes, rheumatoide Arthritis, der postoperative Hallux-valgus-Winkel und der postoperative IMA berücksichtigt, sofern diese zu einer Verbesserung der Modellgüte beitragen.

Tabelle 11 gibt die Ergebnisse der linearen Regression mit dem postoperativen Kraft-Zeit-Integral als abhängige Variable im Bereich des medialen Vorfußes unter Berücksichtigung der o. g. Einflussfaktoren wieder.  $R^2$  betrug 0,345, das korrigierte  $R^2$  0,254,  $F (df = 5;36) = 3,796$ . Das Modell ist signifikant ( $p = 0,007$ ). Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss des postoperativen Intermetatarsalwinkels ( $\beta = -0,326$ ,  $p = 0,022$ ). Zudem hatte der präoperative Ausgangswert signifikanten Einfluss ( $\beta = 0,497$ ,  $p = 0,001$ ).

**Tabelle 11:** Lineare Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals (medialer Vorfuß)

Variable	Postoperatives Kraft-Zeit-Integral (medialer Vorfuß)			
	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	10,267**	3,745		0,009
Operation	0,401	1,943	0,034	0,838
Floating toes	-0,824	1,608	-0,069	0,611
Prozedur am 1. Strahl	0,165	2,014	0,014	0,935
Präop. Kraft-Zeit-Integral (MVF)	0,681**	0,188	0,497**	0,001
Postoperativer IMA	-0,501*	0,209	-0,326*	0,022
$R^2$	0,345			
Korr. $R^2$	0,254			
F (df = 5;36)	3,796**			0,007

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$

Quelle: eigene Darstellung

Das Ergebnis der linearen Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals im Bereich des zentralen Vorfußes ist in Tabelle 12 dargestellt. Dabei wurden als Kofaktoren die Operationsmethode, der präoperative Ausgangswert, Prozeduren am ersten Strahl, das Auftreten von floating toes sowie der postoperative HVA berücksichtigt.  $R^2$  betrug 0,788, das korrigierte  $R^2$  0,757,  $F (df = 5;35) = 25,951$ . Das Modell ist signifikant ( $p < 0,001$ ). Das Auftreten von floating toes beeinflusste signifikant das postoperative Kraft-Zeit-Integral ( $\beta = 0,191$ ,  $p = 0,022$ ), wobei floating toes zu einem um 1,395 %BWs höheren Kraft-Zeit-Integrals im Bereich des zentralen

Vorfußes führten. Des Weiteren zeigte der postoperative Hallux-valgus-Winkel signifikante Auswirkungen auf das postoperative Kraft-Zeit-Integral ( $\beta = -0,216$ ,  $p = 0,015$ ). Der präoperative Ausgangswert hatte ebenfalls signifikanten Einfluss ( $\beta = 0,874$ ,  $p < 0,001$ ).

**Tabelle 12:** Lineare Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals (zentraler Vorfuß)

Variable	Postoperatives Kraft-Zeit-Integral (zentraler Vorfuß)			
	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	-0,335	1,704		0,845
Operation	0,857	0,773	0,121	0,275
Floating toes	1,395*	0,584	0,191*	0,022
Prozedur am 1. Strahl	1,064	0,748	0,146	0,163
Präop. Kraft-Zeit-Integral (CVF)	0,937***	0,099	0,874***	< 0,001
Postoperativer HVA	-0,079*	0,031	-0,216*	0,015
R <sup>2</sup>	0,788			
Korr. R <sup>2</sup>	0,757			
F (df = 5; 35)	25,951***			< 0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 13 zeigt das Ergebnis der linearen Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals im Bereich des lateralen Vorfußes. Als Kovariablen wurden dabei die Operationsmethode, der präoperative Ausgangswert, Prozeduren am ersten Strahl, rheumatoide Arthritis sowie der postoperative IMA berücksichtigt.  $R^2$  betrug 0,557, das korrigierte  $R^2$  0,497,  $F(df = 5;37) = 9,298$ . Das Modell ist signifikant ( $p < 0,001$ ). Rheumatoide Arthritis wirkte sich signifikant auf das postoperative Kraft-Zeit-Integral aus ( $\beta = -0,289$ ,  $p = 0,023$ ). Dabei resultierte rheumatoide Arthritis in einem um 3,366 %BWs niedrigeren Kraft-Zeit-Integral. Des Weiteren beeinflusste der präoperative Ausgangswert das postoperative Kraft-Zeit-Integral signifikant ( $\beta = 0,624$ ,  $p < 0,001$ ).

**Tabelle 13:** Lineare Regression des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals (lateral Vorfuß)

Postoperatives Kraft-Zeit-Integral (lateral Vorfuß)				
Variable	Unstandardisiert	Standardfehler	Standardisiert	Sign.
Konstante	5,564*	2,660		0,043
Operation	-1,698	1,391	-0,185	0,230
Rheumatoide Arthritis	-3,366*	1,424	-0,289*	0,023
Prozedur am 1. Strahl	0,380	1,293	0,041	0,770
Präop. Kraft-Zeit-Integral (LVF)	0,534***	0,097	0,624***	< 0,001
Postoperativer IMA	0,233	0,139	0,191	0,102
R <sup>2</sup>	0,557			
Korr. R <sup>2</sup>	0,497			
F (df = 5; 37)	9,298***			< 0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$ 

Quelle: eigene Darstellung

#### 4.9 Einfluss der Elevation des MT-I

Im Nachfolgenden wurde eine Einteilung der Patienten hinsichtlich des postoperativen Elevationswinkels vorgenommen. Dabei bildeten Patienten mit einem Elevationswinkel gleich null oder positivem postoperativen ELE die Gruppe A; Patienten mit postoperativ negativem Elevationswinkel wurden Gruppe B zugeordnet. Dementsprechend betrug die Anzahl der Patienten in Gruppe A 33 und in Gruppe B 16 (vgl. Tabelle 14).

**Tabelle 14:** Postoperative Elevationswinkel für Gruppe A und B

	Gruppe A (n = 33)	Gruppe B (n = 16)
Mittelwert	1,39° (SD = 1,31)	-2,82° (SD = 2,23)
95%- KI	0,93° bis 1,85°	-4,04° bis -1,60°
Min	0°	-6,9°
Max	5,75°	-0,05°

Quelle: eigene Darstellung

Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Gruppe A und B in Bezug auf den postoperativen AOFAS-Score, FFI-Score, HVA und IMA gefunden werden.

Abbildung 24 zeigt den prä- und postoperativen AOFAS-Score beider Gruppen. Der AOFAS-Score erhöhte sich in beiden Gruppen signifikant von prä- zu postoperativ von 50,8 Punkten (SD = 10,77) auf 67,2 Punkte (SD = 13,77) in Gruppe A ( $p < 0,001$ ) bzw. von 43,9 Punkten (SD = 13,30) auf 59 Punkte (SD = 12,07) in Gruppe B ( $p = 0,004$ ). Es bestanden keine signifikanten

Unterschiede zwischen Gruppe A und B in Hinsicht auf den postoperativen AOFAS-Score oder die absolute Veränderung des AOFAS-Scores.

In Bezug auf den FFI-Score gab es keine signifikanten Veränderungen von prä- zu postoperativ innerhalb der Gruppen, noch wurden signifikante Unterschiede zwischen Gruppe A und B beobachtet (vgl. Abbildung 25).

Der Hallux-valgus-Winkel reduzierte sich signifikant von prä- zu postoperativ von 32,09° ( $SD = 14,29$ ) auf 17,5° ( $SD = 9,29$ ) in Gruppe A ( $p < 0,001$ ) bzw. von 33,13° ( $SD = 18,54$ ) auf 15,99° ( $SD = 10,95$ ) in Gruppe B ( $p < 0,001$ ) (vgl. Abbildung 26).

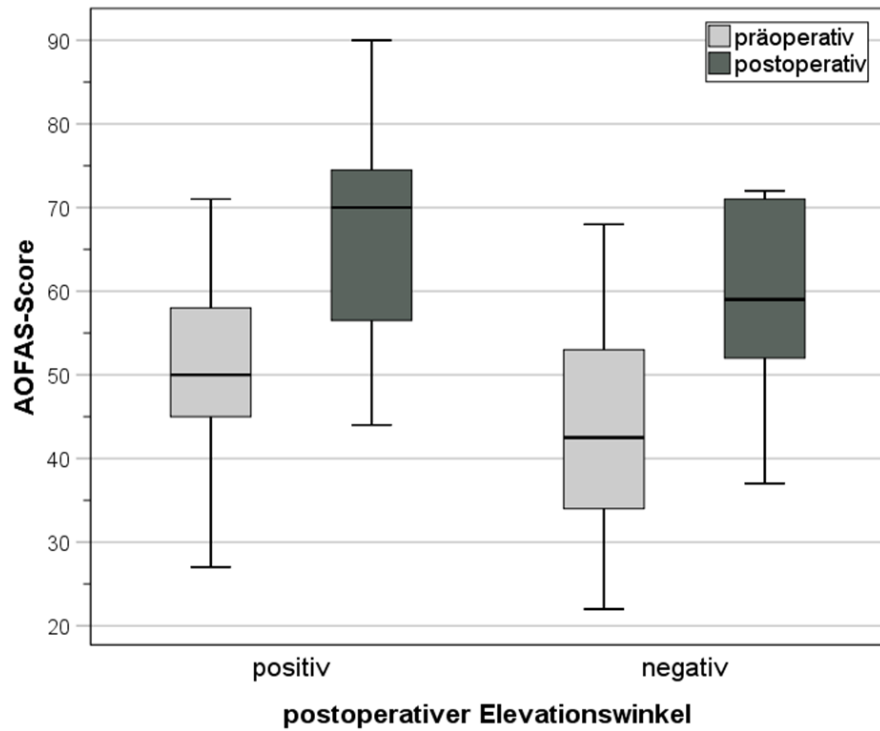
In Bezug auf den postoperativen Hallux-valgus-Winkel sowie die absolute Veränderung des HVA konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Gruppe A und B verzeichnet werden.

Abbildung 27 zeigt prä- und postoperative Intermetatarsalwinkel für Gruppe A und B. Dabei zeigten sich in beiden Gruppen signifikante Unterschiede zwischen prä- und postoperativen IMA: In Gruppe A verringerte sich der Intermetatarsalwinkel von 13,72° ( $SD = 4,17$ ) auf 8,41° ( $SD = 3,52$ ) ( $p < 0,001$ ). In Gruppe B betrug der IMA präoperativ 12,79° ( $SD = 4,25$ ), postoperativ 7,53° ( $SD = 2,62$ ) ( $p < 0,001$ ). Der Vergleich beider Gruppen hinsichtlich des postoperativen IMA bzw. der absoluten Veränderung des IMA erbrachte keine signifikanten Unterschiede.

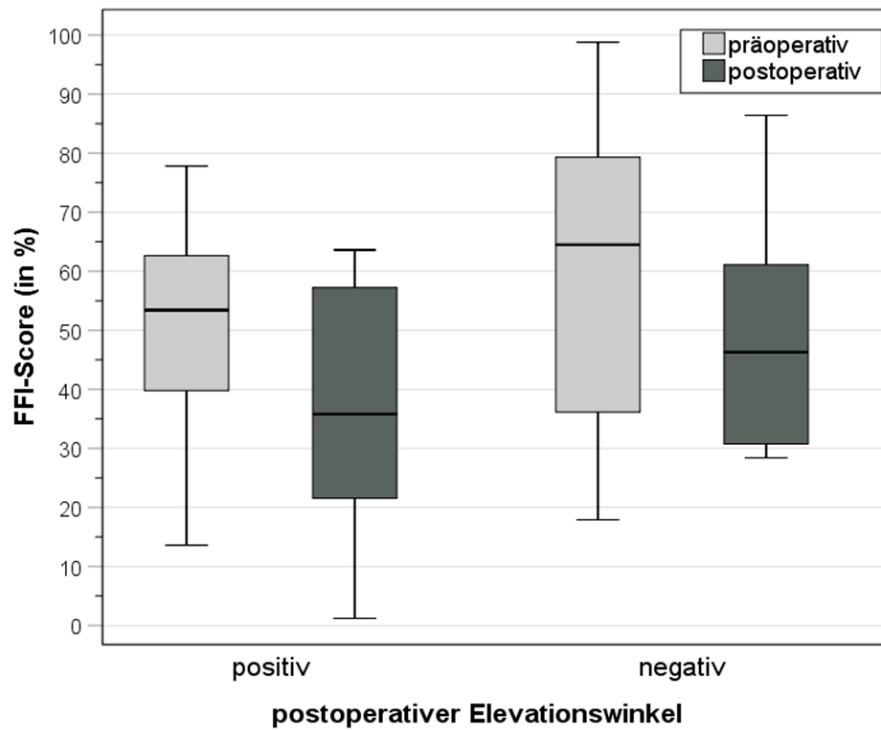
Bei Betrachtung des Spitzendrucks zeigte sich eine signifikante Veränderung des Spitzendrucks im Bereich des Mittelfußes von präoperativ 187,86 kPa ( $SD = 113,42$ ) zu postoperativ 211,79 kPa ( $SD = 121,97$ ) ( $p = 0,016$ ) in Gruppe A. In Gruppe B konnten von prä- zu postoperativ signifikante Veränderungen im Bereich des Mittelfußes von 192,64 kPa ( $SD = 137,03$ ) auf 287,22 kPa ( $SD = 224,83$ ) ( $p = 0,006$ ) und des lateralen Vorfußes von 844,06 kPa ( $SD = 340,65$ ) auf 692,56 kPa ( $SD = 340,33$ ) ( $p = 0,022$ ) beobachtet werden. Beim Vergleich der postoperativen Spitzendrücke (vgl. Abbildung 28) bzw. der absoluten Veränderung des Spitzendrucks konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Gruppe A und B verzeichnet werden.

Die Untersuchung des prä- und postoperativen Kraft-Zeit-Integrals ergab in Gruppe A signifikante Veränderungen. Dabei erhöhte sich das Kraft-Zeit-Integral im Areal des medialen Vorfußes von 9,76 %BW ( $SD = 4,42$ ) auf 12,62 %BW ( $SD = 6,35$ ) ( $p = 0,016$ ). Im Bereich der Kleinzehen wurde eine Reduktion von präoperativ 1,92 %BW ( $SD = 1,49$ ) auf 1,25 %BW ( $SD = 1,24$ ) postoperativ festgestellt ( $p = 0,002$ ). In Gruppe B wurde im Gebiet des Mittelfußes eine signifikante Erhöhung des Kraft-Zeit-Integrals von präoperativ 8,81 %BW ( $SD = 5,42$ ) auf 11,85 %BW ( $SD = 6,92$ ) postoperativ ( $p = 0,017$ ) erfasst.

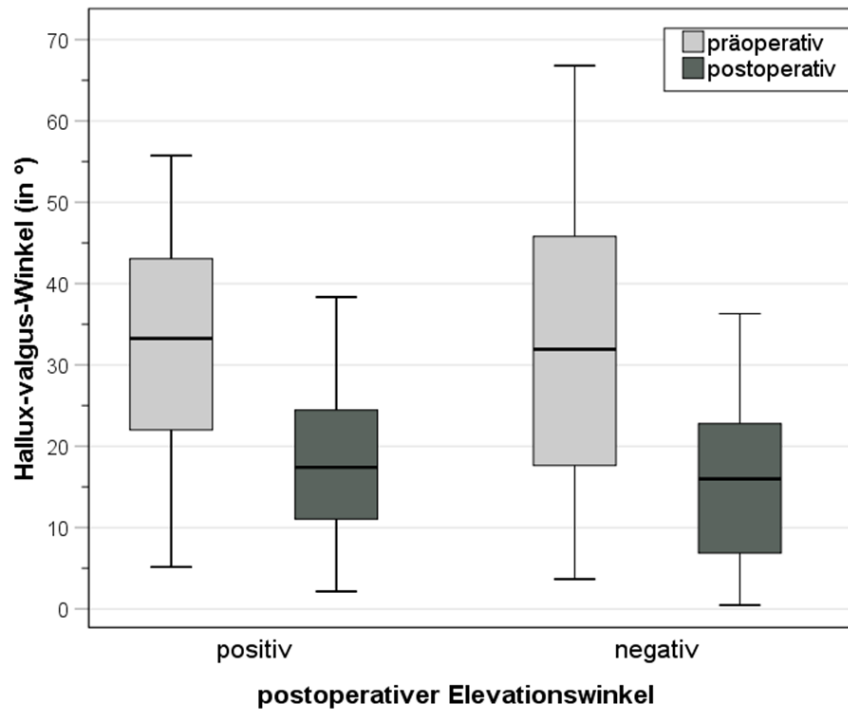
Das postoperative Kraft-Zeit-Integral (vgl. Abbildung 29) bzw. die absolute Veränderung des Kraft-Zeit-Integrals unterschieden sich nicht signifikant zwischen Gruppe A und B.



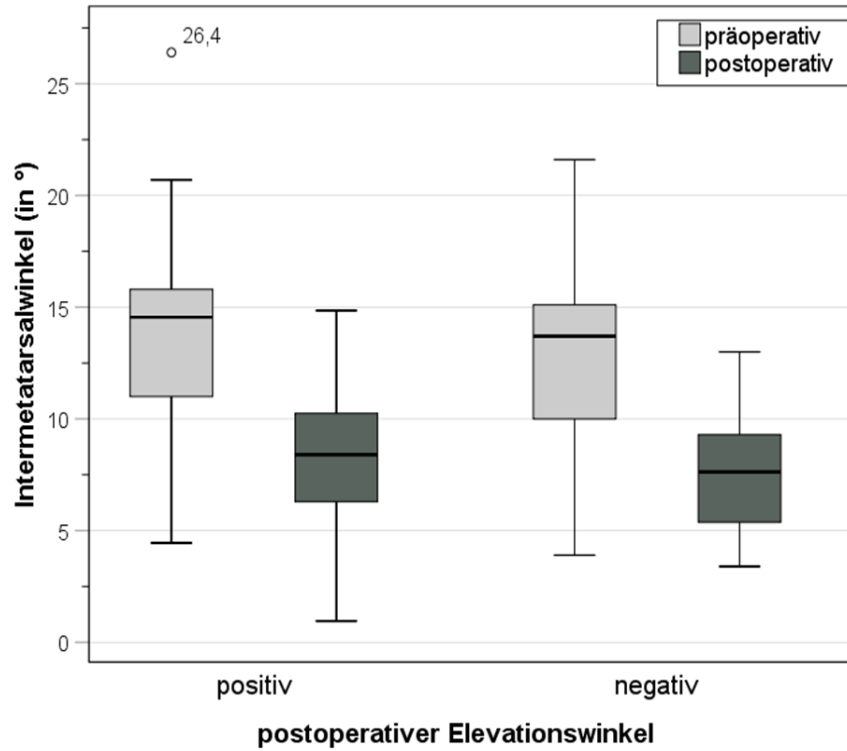
**Abbildung 24:** prä- und postoperativer AOFAS-Score in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel  
 Quelle: eigene Darstellung



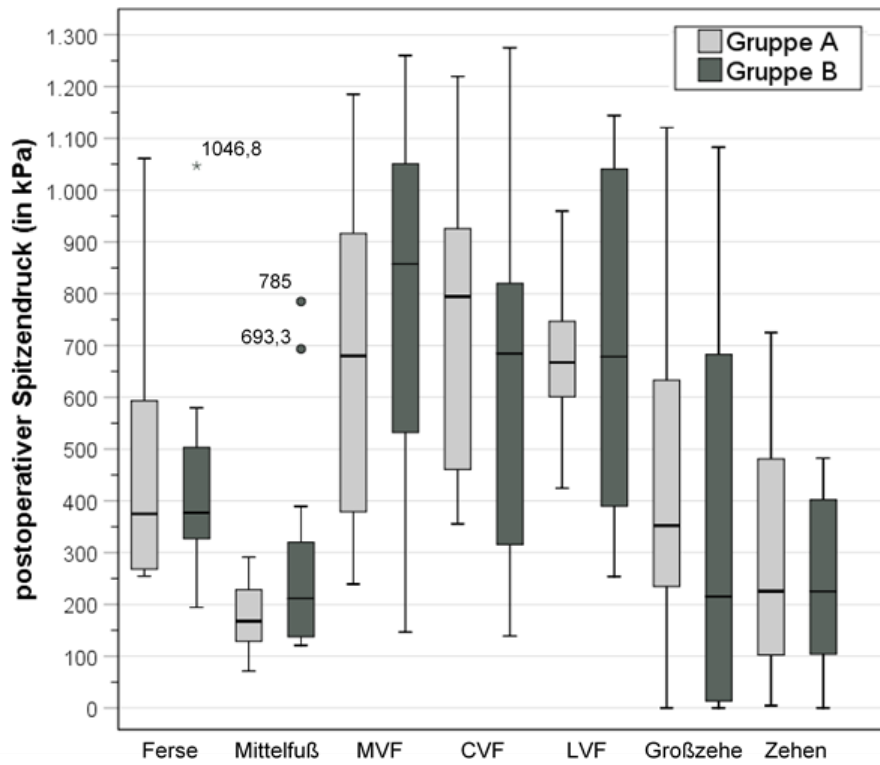
**Abbildung 25:** prä- und postoperativer FFI-Score in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel  
 Quelle: eigene Darstellung



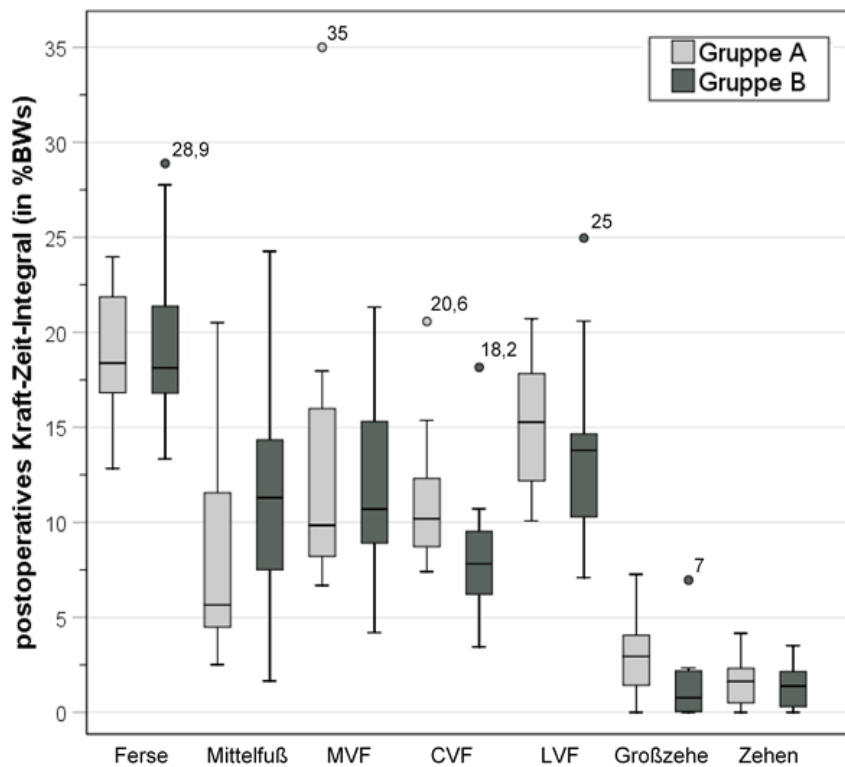
**Abbildung 26:** prä- und postoperativer Hallux-valgus-Winkel in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 27:** prä- und postoperativer Intermetatarsalwinkel in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 28:** postoperativer Spitzendruck in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel  
 Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 29:** postoperatives Kraft-Zeit-Integral in Abhängigkeit vom postoperativen Elevationswinkel  
 Quelle: eigene Darstellung

#### 4.10 Korrelationen

Nachfolgend wurden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern untersucht. In Tabelle 15 ist die Pearson-Korrelation zwischen AOFAS-Score und FFI-Score dargestellt.

Es wurde eine signifikante negative Korrelation ( $r = -0,489$ ,  $p = 0,006$ ) zwischen postoperativem AOFAS-Score und postoperativem FFI-Score beobachtet.

**Tabelle 15:** Pearson-Korrelationskoeffizient für AOFAS-Score und FFI-Score

	Postop. FFI-Score	Absolute Veränderung (FFI)
Postoperativer AOFAS-Score	-0,489**	-0,588**
Sign. 2-seitig	0,006	0,001
Absolute Veränderung (AOFAS)	-0,405*	0,737***
Sign. 2-seitig	0,027	< 0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 16 zeigt, dass weder zwischen postoperativem AOFAS-Score noch zwischen postoperativem FFI-Score und postoperativem Hallux-valgus-Winkel, Intermetatarsalwinkel oder Elevationswinkel des MT-I ein signifikanter Zusammenhang bestand. Zwischen Maestro-Vorfuß-typ und AOFAS-Score bzw. FFI-Score war keine signifikante Korrelation feststellbar.

**Tabelle 16:** Pearson-Korrelationskoeffizient für postoperativen AOFAS-Score, FFI-Score und postoperativen HVA, IMA, ELE

	Postop. HVA	Postop. IMA	Postop. ELE
Postoperativer AOFAS-Score	-0,091	-0,031	0,357
Sign. 2-seitig	0,633	0,867	0,057
Postoperativer FFI-Score	0,077	-0,219	-0,171
Sign. 2-seitig	0,704	0,263	0,415

Quelle: eigene Darstellung

Der Zusammenhang zwischen postoperativem Hallux-valgus-, Intermetatarsal- und Elevationswinkel ist in Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt. Der postoperative Hallux-valgus-Winkel und postoperative Intermetatarsalwinkel waren signifikant positiv ( $r = 0,416$ ,  $p = 0,002$ ) miteinander korreliert. Zwischen postoperativem Elevationswinkel und postoperativem Hallux-valgus-Winkel bzw. Intermetatarsalwinkel fand sich keine signifikante Korrelation. Zwischen Hallux-valgus-Winkel, Intermetatarsalwinkel bzw. postoperativem Elevationswinkel und Maestro-Morphotyp zeigte sich ebenfalls kein signifikanter Zusammenhang.



**Tabelle 17:** Pearson-Korrelationskoeffizient für postoperativen HVA und IMA

	Postoperativer IMA	Absolute Veränderung (IMA)
Postoperativer HVA	0,416**	0,172
Sign. 2-seitig	0,002	0,227
Absolute Veränderung des HVA	0,394**	0,696***
Sign. 2-seitig	0,004	<0,001

signifikant zu \*  $p < 0,05$  \*\*  $p < 0,01$  \*\*\*  $p < 0,001$  Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 18:** Pearson-Korrelationskoeffizient für postoperativen HVA, IMA und ELE

	Postoperativer HVA	Postoperativer IMA
Postoperativer ELE	-0,062	0,08
Sign. 2-seitig	0,674	0,586

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 19 stellt die Pearson-Korrelation zwischen postoperativem Spitzendruck und AOFAS- bzw. FFI-Score dar. Im Bereich der Großzehe ergab eine signifikante negative Korrelation zwischen postoperativem Spitzendruck und postoperativem AOFAS-Score ( $r = -0,353$ ;  $p = 0,047$ ). Für die weiteren Bereiche des Fußes waren keine signifikanten Korrelationen feststellbar.

In Tabelle 20 ist der Zusammenhang zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem AOFAS- bzw. FFI-Score dargestellt. Es bestand kein signifikanter Zusammenhang zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem AOFAS-Score bzw. FFI-Score.

**Tabelle 19:** Pearson-Korrelation postoperativer Spitzendruck und postoperativer AOFAS, FFI-Score

	Postoperativer Spitzendruck						
	Ferse	MF	MVF	CVF	LVF	GZ	Zehen
Postop. AOFAS	-0,051	-0,113	-0,233	-0,018	0,034	-0,353*	0,001
Sign. 2-seitig	0,781	0,538	0,199	0,923	0,854	0,047	0,997
Postop. FFI	0,291	0,087	-0,272	-0,273	0,132	0,009	-0,364
Sign. 2-seitig	0,141	0,666	0,179	0,177	0,521	0,965	0,062

signifikant zu \*  $p < 0,05$  Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 20:** Pearson-Korrelation postoperatives Kraft-Zeit-Integral und postoperativer AOFAS-Score bzw. FFI-Score

	Postoperatives Kraft-Zeit-Integral						
	Ferse	MF	MVF	CVF	LVF	GZ	Zehen
Postop. AOFAS	-0,205	-0,193	-0,048	0,307	0,323	-0,118	0,201
Sign. 2-seitig	0,260	0,290	0,796	0,088	0,071	0,519	0,269
Postop. FFI	0,255	0,013	-0,011	-0,197	-0,196	-0,006	-0,273
Sign. 2-seitig	0,199	0,949	0,958	0,334	0,338	0,977	0,168

Quelle: eigene Darstellung

Der Zusammenhang zwischen postoperativem Spitzendruck und postoperativem Hallux-valgus-Winkel, Intermetatarsal- und Elevationswinkel wird aus Tabelle 21 ersichtlich. Es bestand kein signifikanter Zusammenhang zwischen postoperativem Hallux-valgus- oder Intermetatarsalwinkel und postoperativem Spitzendruck. Im Bereich des Mittelfußes zeigte sich eine signifikante negative Korrelation zwischen postoperativem Elevationswinkel und Spitzendruck ( $r = -0,343$ ;  $p = 0,028$ ). Andere Bereiche des Fußes wiesen keine Zusammenhänge zwischen postoperativem Elevationswinkel und Spitzendruck auf.

**Tabelle 21:** Pearson-Korrelation postoperativer Spitzendruck mit postoperativem HVA, IMA, ELE

	Postoperativer Spitzendruck						
	Ferse	MF	MVF	CVF	LVF	GZ	Zehen
Postop. HVA	0,066	0,218	0,144	-0,168	0,038	-0,135	0,093
Sign. 2-seitig	0,673	0,161	0,362	0,289	0,809	0,388	0,551
Postop. IMA	0,090	-0,129	0,066	0,095	-0,170	0,211	0,017
Sign. 2-seitig	0,561	0,405	0,673	0,545	0,275	0,170	0,914
Postop. ELE	0,084	-0,343*	-0,107	0,038	-0,231	0,076	0,268
Sign. 2-seitig	0,601	0,028	0,513	0,817	0,152	0,637	0,090

signifikant zu \*  $p < 0,05$

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 22 beschreibt die Pearson-Korrelation zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem Hallux-valgus-, Intermetatarsal- und Elevationswinkel. Zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem Hallux-valgus-Winkel war ein signifikanter Zusammenhang im Bereich des Mittelfußes ( $r = 0,325$ ;  $p = 0,034$ ) sowie des zentralen Vorfußes nachweisbar ( $r = -0,367$ ;  $p = 0,017$ ). Im Bereich des medialen Vorfußes lag eine signifikante negative Korrelation zwischen postoperativem IMA und postoperativem Kraft-Zeit-Integral vor ( $r = -0,304$ ;  $p = 0,047$ ). Ein signifikanter positiver Zusammenhang ergab sich zwischen

postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem Elevationswinkel im Bereich des zentralen Vorfußes ( $r = 0,313$ ;  $p = 0,049$ ).

Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen den Zusammenhang zwischen postoperativem Maestro-Morphotyp und postoperativem Spitzendruck bzw. Kraft-Zeit-Integral. Dabei wies der postoperative Morphotyp eine signifikante positive Korrelation zum postoperativen Spitzendruck im Bereich des lateralen Vorfußes auf ( $r = 0,627$ ;  $p = 0,022$ ).

**Tabelle 22:** Pearson-Korrelation postoperatives Kraft-Zeit-Integral mit postoperativem HVA, IMA, ELE

	Postoperatives Kraft-Zeit-Integral						
	Ferse	MF	MVF	CVF	LVF	GZ	Zehen
Postop. HVA	0,126	0,325*	-0,120	-0,367*	0,037	-0,244	-0,036
Sign. 2-seitig	0,420	0,034	0,447	0,017	0,817	0,114	0,818
Postop. IMA	0,075	0,078	-0,304*	-0,265	0,032	0,146	0,015
Sign. 2-seitig	0,629	0,616	0,047	0,085	0,840	0,345	0,924
Postop. ELE	-0,138	-0,259	0,247	0,313*	0,058	0,278	0,260
Sign. 2-seitig	0,388	0,102	0,124	0,049	0,721	0,078	0,100

signifikant zu \*  $p < 0,05$

Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 23:** Korrelation postoperativer Spitzendruck mit postoperativem Maestro-Morphotyp

	Postoperativer Spitzendruck						
	Ferse	MF	MVF	CVF	LVF	GZ	Zehen
Maestro-Morphotyp	0,441	0,470	0,540	0,427	0,627*	0,397	0,336
Sign. 2-seitig	0,436	0,327	0,136	0,514	0,022	0,613	0,818

signifikant zu \*  $p < 0,05$

Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 24:** Korrelation postoperatives Kraft-Zeit-Integral mit postoperativem Maestro-Morphotyp

	Postoperatives Kraft-Zeit-Integral						
	Ferse	MF	MVF	CVF	LVF	GZ	Zehen
Maestro-Morphotyp	0,401	0,494	0,312	0,478	0,351	0,492	0,312
Sign. 2-seitig	0,594	0,245	0,885	0,317	0,787	0,250	0,877

Quelle: eigene Darstellung

## 5 Diskussion

In dieser Studie wurde das Ein-Jahres-Outcome einer Vorfußkorrektur zur Behandlung einer chronischen Metatarsalgie mittels DMMO mit dem einer Weil-Osteotomie verglichen. Dazu wurden klinische Aspekte wie Komplikationsrate und AOFAS-Score erfasst. Die strukturellen Veränderungen der Metatarsalia wurden mittels HVA, IMA, ELE und Maestro-Verfahren untersucht und verglichen. Unterschiede im funktionellen Outcome wurden durch die pedobarografische Messung von Spitzendruck und Kraft-Zeit-Integral erfasst.

Es konnte durch beide Operationsmethoden eine deutliche Verbesserung der Vorfußsituation im Vergleich zu präoperativ erreicht werden. Dies zeigte sich sowohl in den klinischen als auch in den radiologischen und pedobarografischen Ergebnissen.

Das klinische Outcome beider Gruppen zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung war vergleichbar. Allerdings scheint die Weil-Osteotomie eine höhere Rate an Wundheilungsstörungen und Wundinfektionen aufzuweisen im Vergleich zur DMMO. Die radiologischen Ergebnisse waren in beiden Gruppen vergleichbar, wobei postoperativ in beiden Gruppen nur eine geringe Rate an harmonischen Vorfüßen vorlag. Pedobarografisch zeigte sich in beiden Gruppen eine vergleichbare Belastungszunahme des medialen Vorfußes. Im Bereich des lateralen Vorfußes zeigte sich nach Weil-Osteotomie eine Zunahme des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals, wohingegen nach DMMO eine Abnahme beobachtet wurde.

Zunächst sollen die allgemeinen Charakteristika beider Gruppen betrachtet werden. In den untersuchten Gruppen fanden sich überwiegend Frauen. Dies erscheint nicht ungewöhnlich, da das untersuchte Krankheitsbild gehäuft bei Frauen auftritt (Haque et al. 2016). Auch das Alter zum Operationszeitpunkt mit durchschnittlich 57,3 bzw. 65,3 Jahren ist nicht untypisch, da es über Jahre zur Progredienz der Erkrankung kommt. (Coughlin und Jones 2007).

Es wird weiterhin ersichtlich, dass zusätzlich zur betrachteten Weil-Osteotomie bzw. DMMO zahlreiche andere Operationen am Vorfuß zeitgleich ausgeführt wurden. Dies liegt in der Komplexität der Vorfußdeformität begründet. Wie bereits anfangs erwähnt, tritt eine Metatarsalgie höchst selten als alleiniges Krankheitsbild auf, sondern ist meist mit anderen Fehlstellungen, wie einem Hallux valgus oder Krallenzehen vergesellschaftet. Da diese auch einen Beitrag zur Entstehung der Metatarsalgie leisten, ist zur optimalen Versorgung des Patienten meist eine umfangreiche Korrektur durch verschiedene Operationsverfahren notwendig. Dies erschwert es, die Effekte der Weil-Osteotomie bzw. DMMO isoliert zu betrachten, da der Einfluss anderer Faktoren nie ganz ausgeschlossen werden kann. Da in der Realität allerdings häufig die gesamte komplexe Vorfußkorrektur notwendig ist, um die Symptomatik zu beheben, bildet

die Studie die tatsächliche Situation in der Praxis ab. Wichtig ist zu betrachten, welche Rolle die gewählte Operationsmethode in Zusammenhang mit anderen Maßnahmen spielt.

## **5.1 Klinisches Outcome**

### **5.1.1 Komplikationen**

Im Folgenden soll betrachtet werden, welchen Einfluss das gewählte Operationsverfahren auf das klinische Outcome hatte. Die dazu erfassten Komplikationsraten beider Operationsverfahren wiesen einige Unterschiede auf. Wundheilungsstörungen traten nach einer Weil-Osteotomie deutlich häufiger auf als nach einer DMMO. Auch Wundinfektionen schienen häufiger aufzutreten, wobei der Unterschied hier nicht so stark hervortrat. Dies könnte durch die geringe Fallzahl begründet und eventuell bei höheren Fallzahlen deutlicher erkennbar sein. Die höhere Zahl der Infektionen nach einer Weil-Osteotomie könnte auf den größeren Gewebeschnitt, welcher bei diesem Operationsverfahren erforderlich ist sowie auf die Verwendung von Kirschner-Drähten zurückzuführen sein. Bereits im Vorfeld wurde die geringere Invasivität der DMMO als potentieller Vorteil dieses Verfahrens diskutiert (Botezatu et al. 2015). Unsere Ergebnisse deuten ebenfalls darauf hin, dass die DMMO hinsichtlich der Wundprobleme der Weil-Osteotomie überlegen ist. Damit bestätigt die Arbeit die Ergebnisse von Redfern et al. (2015) und Rivero-Santana et al. (2019). Die DMMO erscheint daher insbesondere für Patienten, bei denen z.B. aufgrund von peripherer arterieller Verschlusskrankheit oder Diabetes mellitus ein erhöhtes Risiko für Wundheilungsstörungen vorliegt, geeignet. Eine Studie, bei der die DMMO zur Behandlung von chronischen plantaren Ulcera bei diabetischer Neuropathie zum Einsatz kam, zeigte gute Ergebnisse hinsichtlich Infektionsraten und Wundheilungsstörungen (Mehlhorn et al. 2020).

Beide Verfahren zeigten eine gute Knochenheilungsrate. Die Pseudoarthrosenbildung galt als potenzieller Nachteil der DMMO, da bei diesem Verfahren, im Gegensatz zur Weil-Osteotomie keine Osteosynthese erfolgt. Es wurden in beiden Gruppen keine Pseudoarthrosen beobachtet. Dennoch war der Zeitraum bis zur vollständigen Knochenheilung nach DMMO mit 8-12 Wochen länger im Vergleich zur Weil-Osteotomie (6 Wochen). Zurückzuführen ist dies wahrscheinlich auf die fehlende Osteosynthese bei DMMO, wobei die verzögerte Knochenheilung nicht zur Verzögerung der postoperativen Rehabilitation geführt hat. Die Patienten waren im Gegenteil aufgrund der schnellen Weichteilheilung eher in der Lage konventionelles Schuhwerk zu tragen. Ferner wurden in zwei Fällen Materialkonflikte nach Weil-Osteotomie beobachtet, wodurch ein Jahr postoperativ eine erneute Operation zur Materialentfernung erforderlich war. Der Vorteil der verkürzten Frakturheilungszeit durch eine Osteosynthese birgt dies als potenzielle Komplikation. Bei einer DMMO kann dies gemäß der Natur des Verfahrens nicht auftreten. Ähnliche

Ergebnisse beschreiben Henry et al. in ihrer Studie aus dem Jahr 2011. Pseudoarthrosen werden hingegen selten beobachtet - in einer systematischen Übersichtsarbeit von Highlander et al. (2011) wird die Rate der Pseudoarthrosen nach Weil-Osteotomie mit drei Prozent angegeben. In beiden Gruppen trat in jeweils einem Fall die Metatarsalgie postoperativ wieder auf. Zurückzuführen war dies auf einen nicht harmonischen Vorfuß. Mit 2,5 % in Gruppe 1 bzw. 2,3 % in Gruppe 2 ist dies seltener, als in der Literatur beschrieben. Highlander et al. (2011) beschreiben ein Wiederauftreten der Symptome nach Weil-Osteotomie in 12,5 % der Fälle bzw. Transfermetatarsalgien bei 7 % der Patienten, wobei dies stark variieren kann. Ähnliche Ergebnisse fanden Henry et al. (2011), wobei diesbezüglich kein Unterschied zwischen Weil-Osteotomie und DMMO festgestellt werden konnte. In einer Studie von Prado et al. (2016) wurden nur in 2 % der Fälle nach DMMO eine Transfermetatarsalgie beobachtet.

Als häufigste auftretende Komplikation einer Weil-Osteotomie gelten floating toes (Beech et al. 2005). In einer systematischen Übersichtsarbeit traten in 36 % der Fälle nach einer Weil-Osteotomie floating toes auf (Highlander et al. 2011). Noch häufiger wird eine Bewegungseinschränkung des MTP-Gelenks beobachtet (Vandeputte et al. 2000; O'Kane und Kilmartin 2002; Hofstaetter et al. 2005; Pérez-Muñoz et al. 2012). Der intraartikuläre Eingriff kann zur Vernarbung der Gelenkkapsel und verringerter Beweglichkeit der Zehe mit Verlust des Bodenkontaktes führen. Eine Hypothese lautete, dass sich diese postoperative Steifheit durch ein extraartikuläres Verfahren reduzieren ließe. In dieser Studie wurden bei 63 % der Patienten nach Weil-Osteotomie floating toes beobachtet. Nach DMMO traten diese in 48 % der Fälle auf. Dies könnte auf die verbesserte Beweglichkeit des MTP-Gelenks nach DMMO zurückzuführen sein. Der Unterschied war allerdings nicht signifikant. Nach DMMO konnte in vergleichbaren Studien eine geringfügig bessere Beweglichkeit des MTP-Gelenks (Yeo et al. 2016) sowie eine geringere Rate an floating toes im Vergleich zur Weil-Osteotomie gezeigt werden (Henry et al. 2011; Johansen et al. 2019). Diese Tendenz konnte in dieser Arbeit bestätigt werden, auch wenn die Unterschiede nicht signifikant waren.

### **5.1.2 AOFAS-Score**

Weiterhin sollte untersucht werden, wie sich das gewählte Operationsverfahren auf den AOFAS-Vorfußscore auswirkte. Dabei konnte nach beiden Operationsmethoden eine deutliche Verbesserung der Werte von 60 auf 81 Punkte nach Weil-Osteotomie bzw. von 51 auf 72 Punkte nach DMMO beobachtet werden. Dies zeigt, dass die Metatarsalgie mit diesen Operationsverfahren gut behandelt werden kann. Die postoperativen Ergebnisse beider Gruppen waren vergleichbar. Hingegen zeigten sich deutlich höhere präoperative Ausgangswerte in der Weil-Osteotomie Gruppe. Die Betrachtung der absoluten Veränderung der Scorewerte (jeweils 21

Punkte) bestätigte die Ebenbürtigkeit beider Verfahren. Individuell gab es große Unterschiede zwischen den AOFAS-Werten mit maximalen Steigerungen des AOFAS-Scores von 40 (Weil) bzw. 42 Punkten (DMMO).

Zur genaueren Untersuchung möglicher Einflussfaktoren auf den AOFAS-Score wurde eine lineare Regression durchgeführt. Mit Hilfe des angewendeten Modells konnten 35,1 % der Variation des postoperativen AOFAS-Scores durch die gewählte Operationsmethode, zusätzliche Kleinzeheoperationen, Prozeduren am ersten Strahl, das Patientenalter zum Operationszeitpunkt, rheumatoide Arthritis sowie den präoperativen Ausgangswert erklärt werden. Von den genannten Faktoren hatte lediglich der präoperative Ausgangswert einen signifikanten Einfluss auf den postoperativen AOFAS-Score, wobei eine Erhöhung des Ausgangswertes in einem um 0,46 Punkte höheren postoperativen Score resultierte. Dies bestätigt, dass das klinische Outcome maßgeblich von der präoperativen individuellen Ausgangssituation des Patienten abhängt. Den größten Einfluss auf den postoperativen AOFAS-Score hatte die gewählte Operationsmethode. Dabei resultierte eine DMMO im Vergleich zur Weil-Osteotomie unter Berücksichtigung der restlichen o.g. Faktoren in einem um 12,8 Punkte schlechteren Scorewert. Allerdings war dieses Ergebnis nicht signifikant. Trotz Berücksichtigung verschiedener Kofaktoren gelingt es nicht immer alle Einflussfaktoren zu erfassen und korrekt durch das Modell abzubilden, sodass diese immer fehlerbehaftet bleibt. In der DMMO-Gruppe lagen komplexere Vorfußdeformitäten vor und es wurden 34 % Rheumatiker in der DMMO-Gruppe im Vergleich zu 11 % in der Weil-Gruppe eingeschlossen. Es wurde versucht diese Unterschiede bestmöglich durch Erhebung des präoperativen AOFAS-Scores zu erfassen, dennoch kann ein gewisser Einfluss auf das Ergebnis nicht ganz ausgeschlossen werden.

Den zweitgrößten Einfluss hatte das Patientenalter, welches sich geringfügig negativ auf den postoperativen Score auswirkte. Durch die Durchführung einer knöchernen Kleinzeheoperation konnte eine Verbesserung des postoperativen AOFAS-Scores um 6,95 Punkte erzielt werden. Eine zusätzliche Operation des ersten Strahls schien sich eher negativ auf den postoperativen Score auszuwirken. Rheumatoide Arthritis wurde ebenfalls als Confounder berücksichtigt, schien aber nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis zu haben.

Dieses Ergebnis bestätigt, dass Weil-Osteotomie und DMMO in Bezug auf den postoperativen AOFAS-Wert gleichwertig sind. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass nicht nur die Operationsmethode als einzelner Faktor das postoperative klinische Outcome bedingt, sondern dieses durch das Zusammenwirken vieler Faktoren bedingt wird. Daher sollte im Rahmen der Therapie immer die Gesamtsituation des Patienten im Mittelpunkt stehen.

Die lineare Regression stellt eine gute Methode dar, um den Einfluss von Störfaktoren auf das Ergebnis zu verringern. In Anbetracht der inhomogenen Patientengruppen, die untersucht

wurden, ist die Anwendung dieses Verfahrens durchaus gerechtfertigt, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die unterschiedlichen Ausgangssituationen der Patienten das Ergebnis beeinflussen. Dennoch sollte bedacht werden, dass auch in einer Regression nur eine begrenzte Anzahl Kofaktoren berücksichtigt werden kann und erklärende Einflussfaktoren auch unerkannt bleiben können. Die Aussagekraft des Modells ist daher nur begrenzt und sollte zurückhaltend interpretiert werden.

Hofstaetter et al. (2005) konnten ebenfalls einen Anstieg des AOFAS-Scores von 48 auf 75 Punkte nach Durchführung einer Weil-Osteotomie beobachten. Ähnliches beobachteten auch García-Rey et al. (2004) mit postoperativen Scorewerten von 86 Punkten. Weitere Studien zeigen postoperative AOFAS-Scorewerte nach Weil-Osteotomie von 77 Punkten (Trnka et al. 1999) bzw. 79 Punkten (Khurana et al. 2011).

Auch nach DMMO konnten Prado et al. (2016) einen deutlichen Anstieg des AOFAS-Scores von 46 auf 89 Punkte zeigen. Bei vergleichenden Studien von DMMO und Weil-Osteotomie zeigten sich bisher keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich postoperativer AOFAS-Scores (Henry et al. 2011; Yeo et al. 2016; Rivero-Santana et al. 2019). Somit erscheint die DMMO der Weil-Osteotomie diesbezüglich gleichgestellt.

Der AOFAS Vorfußscore ist ein weit verbreitetes, valides und in zahlreichen Studien eingesetztes Scoring-Instrument (Ibrahim et al. 2007). Sein Einsatz ermöglicht es klinische Veränderungen systematisch abzubilden, wodurch eine objektivere Bewertung als bei subjektiven Analogskalen erreicht werden kann (Kitaoka et al. 1994). Als Kritikpunkt am AOFAS-Score benennen (SooHoo et al. 2003) seine starke Schmerzbezogenheit. Daraus ergibt sich eine niedrigere Validität für Krankheiten bei denen Symptome wie Steifheit oder Deformität im Vordergrund stehen. Die Funktionalität des Fußes kann daher nur eingeschränkt abgebildet werden. Diesem Problem wurde durch die Erfassung weiterer Parameter wie der pedobarografischen Untersuchung und des FFI-Scores begegnet. Zudem steht bei Metatarsalgie die Schmerzsymptomatik im Vordergrund. Des Weiteren wird die Schmerzstärke bei Patienten mit Nervenverletzungen, peripherer Neuropathie oder Schmerzen und Behinderungen aus sekundären Gründen verstärkt, weshalb der Score nur begrenzt einsetzbar ist. Patienten mit sekundären Metatarsalgien wurden aus der Studie ausgeschlossen. Weiterhin sehen SooHoo et al. (2003) die klinische Untersuchung als problematisch an, welche Bestandteil des Scores ist. Diese kann zu schlechter Inter- und Intrauntersucherreliabilität führen. Da alle Scores von demselben Untersucher erhoben wurden, konnte diesem Problem gut begegnet werden.

### **5.1.3 FFI-Score**

Des Weiteren sollte die Veränderung des FFI-Scores durch die Operation betrachtet werden.



Der FFI-Score ist ein weit verbreiteter Score, welcher auf der subjektiven Einschätzung des Patienten beruht. Er zeigt eine gute Retest-Reliabilität (Budiman-Mak et al. 1991; Riskowski et al. 2011) und gilt als valides Messinstrument für Krankheiten, die in Aktivitätseinschränkung, Schmerzen oder Behinderung resultieren (SooHoo et al. 2006). Damit liefert er ein gutes Abbild der Funktionalität des Fußes.

Aufgrund der retrospektiven Datenerhebung konnte der FFI-Score nur bei Patienten mit DMMO erfasst werden. In dieser Studie reduzierte sich der FFI-Score von 60,18 % auf 36,20 %, wobei höhere Scorewerte gleichbedeutend sind mit schlechterer Gesundheit und Lebensqualität (Riskowski et al. 2011). Durch die Operation wurde auch nach subjektiver Einschätzung des Patienten eine deutliche Verbesserung erzielt. Biz et al. (2018) beobachteten ähnliche Veränderungen des FFI-Scores nach DMMO mit einer Reduktion von 43,2 % auf 7,8 % nach DMMO. Es wurde eine erwartbare negative Korrelation des postoperativen AOFAS-Scores und FFI-Scores gefunden. Eine Erhöhung des AOFAS-Scores führt dementsprechend zu einer Reduktion des FFI-Scores, was in beiden Scores einer verbesserten klinischen Situation entspricht. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Ibrahim et al. (2007).

## **5.2 Radiologisches Outcome**

Anhand der radiologischen Messungen konnte die Stellung des ersten Strahls erfasst werden. Präoperativ lag bei den untersuchten Personen häufig ein Hallux valgus vor, welcher im Rahmen der Insuffizienz des ersten Strahls eine Fehlbelastung des Fußes mit daraus resultierender Metatarsalgie bedingen kann (Waldecker 2002).

In beiden untersuchten Gruppen konnte postoperativ eine deutliche Verringerung des Hallux-valgus-Winkels nach der Operation festgestellt werden. In der Gruppe der Weil-Osteotomie reduzierte dieser sich von 36,15° auf 16,97°. In der DMMO-Gruppe betrug der Winkel präoperativ 30,57°, postoperativ hingegen 17,24°. In beiden Gruppen waren die Ausgangswerte, die postoperativen Winkel sowie die individuelle Korrektur vergleichbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass in beiden Gruppen eine vergleichbare gute postoperative Einstellung des ersten Strahls auf physiologische Werte erzielt werden konnte.

Der Intermetatarsalwinkel wurde ebenfalls im Rahmen der komplexen Vorfußkorrektur verbessert. Er verringerte sich von 15,97° auf 8,1° (Weil) bzw. von 12,36° auf 8,4° (DMMO). Postoperativ bestand kein Unterschied zwischen beiden Gruppen. Es zeigte sich, dass die Reduktion des Intermetatarsalwinkels nach einer Weil-Osteotomie deutlich stärker ausfiel als nach DMMO (7,87° vs. 3,95°). Dieser Unterschied lässt sich auf die größeren präoperativen IMA-Winkel in der Weil-Osteotomie Gruppe zurückführen. In allen Fällen konnte der Intermetatarsalwinkel normalisiert werden und eine gute postoperative Stellung des ersten Strahls erreicht werden.

Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen Hallux-valgus- und Intermetatarsalwinkel. Insbesondere die absolute Veränderung des Winkels, aber auch der postoperative Winkel wiesen einen deutlichen positiven Zusammenhang auf. Eine schlechtere Stellung des ersten Strahls, im Sinne eines Hallux valgus, mit erhöhtem Hallux-valgus-Winkel geht auch immer mit vergrößertem Intermetatarsalwinkel einher (Coughlin und Jones 2007).

Zwischen Hallux-valgus-Winkel bzw. Intermetatarsalwinkel und AOFAS-Score bestand kein Zusammenhang, genauso wenig wie zwischen HVA bzw. IMA und FFI-Score. Eine Studie von Thordarson et al. (2005) zeigt eine Verbesserung des AOFAS-Scores nach Hallux valgus Korrektur, welche allerdings nicht mit dem Ausmaß der Winkelkorrektur korreliert.

Um die Einstellung des MT-I in der Sagittalebene zu erfassen wurde das Winkelverhältnis des MT-I im Vergleich zum MT-II bestimmt. Physiologisch wäre ein negativer Elevationswinkel, d. h. das erste Metatarsale steht in der Seitenaufnahme tiefer als das Zweite.

In der Gruppe der Weil-Osteotomie lag präoperativ in 11 Fällen ein negativer und in 10 Fällen ein positiver Elevationswinkel vor. In der DMMO-Gruppe waren es präoperativ jeweils 14 Fälle mit einem positiven bzw. negativen ELE. Postoperativ erhöhte sich die Zahl der positiven Elevationswinkel auf 15 (Weil) bzw. 18 (DMMO). Dementsprechend verringerte sich die Anzahl negativer Winkel auf sechs (Weil) bzw. 10 (DMMO). Die Anzahl positiver oder negativer Winkel war in beiden Gruppen postoperativ vergleichbar. Es konnte keine signifikante Veränderung in der Häufigkeit positiver oder negativer Winkel von prä- zu postoperativ festgestellt werden, auch wenn sich postoperativ in beiden Gruppen eine Zunahme der Fälle mit leicht positivem Elevationswinkel zeigte. In sieben Fällen mit initial negativem Winkel konnte eine Veränderung desselben hin zu positiven Winkeln beobachtet werden. Der Elevationswinkel scheint nicht durch eine Weil-Osteotomie bzw. DMMO verändert zu werden.

Der Stellung des ersten Strahls kommt bei der Entstehung einer Metatarsalgie eine besondere Bedeutung zu. Eine Elevation des ersten Strahls ist ein wichtiger Risikofaktor für die Entstehung einer Transfermetatarsalgie (Klos et al. 2013; Gutteck et al. 2018). Durch operative Verfahren kann eine leichte Absenkung des ersten Strahls und somit eine relative Entlastung der lateralen Metatarsalia erzielt werden (Gutteck et al. 2018). Klos et al. (2013) beschreiben eine Reduktion des Elevationswinkel von 4° auf 1,5° nach Lapidusarthrodese mit plantarer Plattenosteosynthese. Gutteck et al. (2018) berichten ebenfalls eine Reduktion von 4° auf -1,8° nach modifizierter Lapidusarthrodese.

Um den Einfluss der Elevation des MT-I auf das klinische Outcome und die postoperative Druckverteilung unabhängig von der gewählten Operationsmethode besser abschätzen zu können, erfolgte eine Einteilung der Patienten nach dem postoperativen Elevationswinkel in zwei

Gruppen mit jeweils 16 Fällen (negativer ELE;  $MW = -2,82^\circ$ ) bzw. 33 Fällen (positiver ELE,  $MW = 1,39^\circ$ ).

Gutteck et al. (2018) konnten zeigen, dass ein negativer Elevationswinkel mit einem besseren klinischen Outcome im Sinne eines höheren AOFAS-Scores verbunden ist. In dieser Arbeit konnte kein Zusammenhang zwischen postoperativem Elevationswinkel und AOFAS-Score bzw. FFI-Score gefunden werden. Dies könnte durch die Inhomogenität der untersuchten Gruppen bedingt sein.

Es bestand kein Zusammenhang zwischen postoperativem Hallux-valgus- bzw. Intermetatarsalwinkel und postoperativem Elevationswinkel.

Die strukturellen Veränderungen der Metatarsalia wurden mit Hilfe des Maestro-Verfahrens untersucht. Dabei sollte überprüft werden, wie die Operationsmethode den Vorfußmorphotyp nach Maestro beeinflusst.

Präoperativ bestand bei einem Großteil der Patienten in beiden Gruppen eine Überlänge des zweiten und dritten Metatarsale. Dies äußerte sich entweder als M2M3 long Morphotyp oder als M4M5 Hypoplasie, welche in allen sechs bzw. acht Fällen auf einer Überlänge von M2 und M3, bei deutlicher Überlänge von M2 beruhte. In einem Fall in Gruppe 1 bzw. sieben Fällen in Gruppe 2 war die Überlänge von M2 präoperativ so stark, dass ein M1 short Typ resultierte. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Überlänge des M2 und M3 zur Entstehung einer Metatarsalgie beitragen kann (Fadel et al. 2002). In drei Fällen bestand jeweils ein harmonischer Morphotyp. Ein optimales Vorfußalignment scheint das Auftreten einer Metatarsalgie somit nicht verhindern zu können, was die Komplexität des Krankheitsbildes widerspiegelt.

Postoperativ unterschieden sich beide Gruppen in der Häufigkeit des Morphotyps M2M3M2 long bei M4M5 Hypoplasie, wobei dieser nach DMMO in 11 Fällen beobachtet wurde, nach Weil-Osteotomie hingegen gar nicht. Gleichzeitig wurde nach Weil-Osteotomie in fünf Fällen ein nach dem Maestro-Schema nicht zuordenbarer Morphotyp beobachtet.

Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen prä- und postoperativem Morphotyp. Daher soll dies genauer beleuchtet werden.

Die Weil-Osteotomie wurde in fast allen Fällen nur am zweiten Strahl durchgeführt. Dadurch konnte eine Überlänge des M2 reduziert werden. Dies reichte jedoch nicht aus, um einen harmonischen Vorfuß zu erzeugen. In sechs Fällen blieb die vorherige M2M3 long Konfiguration weiterhin bestehen. Die deutliche Überlänge des M2 im Vergleich zu M3 konnte reduziert werden. Dies zeigt sich in der deutlichen Abnahme der M4M5 Hypoplasien vom M2M3M2 long Typ. Allerdings wurde eine schon vorbestehende Überlänge des M3, welche geringer ausgeprägt war als die des M2, nicht berücksichtigt und es erfolgte keine Korrektur des M3. Dadurch

erfolgte eine Wandlung hin zu M2M3 long. In einem Fall entstand postoperativ eine M4M5 Hypoplasie vom M3 long Typ. Hier erfolgte eine Kürzung des M2 auf normale Länge ohne Berücksichtigung des M3.

In zwei Fällen konnte ein harmonischer Vorfuß aus dem M2M3 long Morphotyp erzeugt werden. Dies beruhte auf der gleichzeitigen Korrektur von M2 und M3.

Zusätzlich entstanden fünf Morphotypen, welche sich nicht nach dem Maestro-Schema einordnen ließen. In drei Fällen bildete M3 postoperativ als längstes Metatarsale den Scheitelpunkt der Metatarsalenparabel. Ursächlich war die übermäßige operative Kürzung des M2. Intraoperative Röntgenaufnahmen zeigten ein besseres Alignment mit gleicher Länge der beiden Metatarsalia. Erst im Stehen nach abgeschlossener Heilung angefertigte Röntgenaufnahmen offenbarten die Überlänge des M3. In zwei von drei Fällen resultierten daraus keine klinischen Komplikationen. In einem Fall kam es postoperativ zum Wiederauftreten der Metatarsalgie. Die dazugehörigen pedobarografischen Ergebnisse zeigten eine deutliche Belastung im Bereich des M3 ähnlich der präoperativen Situation. Eine Entlastung des M2 war im Vergleich zu präoperativ nicht erkennbar. Im Falle der Remetatarsalgie zeigte sich zudem eine Lateralisierung der Hauptbelastung hin zu M3 bzw. 4. In zwei Fällen zeigten die abschließenden Röntgenaufnahmen eine relative Überlänge des vierten Metatarsale. In beiden Fällen war eine operative Korrektur des ersten bis dritten Strahls erfolgt. Somit konnte zwar ein optimales Verhältnis der ersten drei Strahlen zueinander erzielt werden, allerdings wäre theoretisch eine komplexe Vorfußkorrektur unter Einbeziehung aller Metatarsalia für ein optimales Korrekturergebnis notwendig gewesen. Klinische Auswirkungen hatte die Überlänge des M4 nicht. Pedobarografische Ergebnisse zeigten eine leichte Mehrbelastung im Bereich des M4 und 5 im Vergleich zu präoperativen Aufnahmen, dennoch aber eine gute Lastaufnahme des M1.

In der Gruppe der DMMO bestand in vier Fällen postoperativ ein harmonischer Morphotyp. In drei Fällen gelang dies durch entsprechende Kürzung von M2 und M3. In einem Fall lag bereits präoperativ ein harmonischer Morphotyp vor. Durch übermäßige Kürzung von M2 und M3 entstand in drei Fällen postoperativ ein M1 long Typ. Öfter wurde jedoch eine zu geringe Kürzung des M2 und M3 beobachtet. In sieben Fällen lag präoperativ ein M1 short Morphotyp vor, welcher in drei Fällen postoperativ erhalten blieb. Durch eine Kürzung von M2 und M3 konnte die Situation verbessert werden, allerdings war die Kürzung nicht ausreichend, um mit einem harmonischen Morphotyp einherzugehen. In den restlichen vier Fällen entstand eine M4M5 Hypoplasie. In drei Fällen war die Kürzung des M2 und M3 nicht ausreichend, sodass der präoperativ vorliegende M2M3 long Morphotyp erhalten blieb. In zwei Fällen erfolgte die Kürzung des zweiten Metatarsale, allerdings ohne ausreichende Korrektur des M3, sodass aus einer relativen Überlänge des M2 ein M2M3 long Morphotyp entstand bzw. eine relative

Überlänge des M3 resultierte. Umgekehrt wurde in dreizehn Fällen M3 ausreichend, M2 aber unzureichend korrigiert, wodurch postoperativ eine M4M5 Hypoplasie mit entsprechender Überlänge des zweiten Metatarsale entstand.

Es zeigt sich deutlich, dass die Korrektur des Vorfußes hin zu einem harmonischen Alignment nicht einfach ist. Der postoperative Morphotyp wird nicht nur durch die Operationsmethode, sondern auch maßgeblich durch den präoperativen Morphotyp beeinflusst. Nach DMMO trat häufig ein M2M3M2 long Typ bei M4M5 Hypoplasie auf, wobei häufig eine zu geringe Kürzung des zweiten und dritten Metatarsale als ursächlich angenommen werden kann. Nach Weil-Osteotomie traten in mehreren Fällen nach dem Maestro-Schema nicht zuordenbare Morphotypen auf. Hier konnte keine korrekte Metatarsalenparabel hergestellt werden.

Durch eine isolierte Kürzung eines Metatarsale gelingt es häufig nicht ein harmonisches Vorfußalignment zu erzielen. Somit ist eine komplexe Vorfußkorrektur mit Kürzungen an weiteren Metatarsalia, trotz häufig beschwerdefreien und nicht pathologisch veränderten MTP-Gelenken zum Erzielen eines harmonischen Vorfußes notwendig. Dies wird auch von Maestro et al. (2003) empfohlen, falls es durch Korrektur eines Strahls zum unharmonischen Vorfuß kommt. Auch Redfern und Vernois (2016) empfehlen eine Osteotomie am zweiten bis vierten Metatarsale durchzuführen, um Transfermetatarsalgien zu vermeiden. Dennoch ist die klinische Relevanz eines harmonischen Morphotyps zu diskutieren. Jarde et al. (2001) beobachteten, dass Patienten mit postoperativ harmonischem Vorfuß ein besseres Outcome hatten, als solche, die davon abwichen. Beech et al. (2005) konnten zeigen, dass Patienten nach einer Hallux valgus Operation bei sonst postoperativ aberranter Metatarsalenparabel von einer prophylaktischen Weil-Osteotomie profitieren.

In dieser Studie wurde kein Zusammenhang zwischen dem AOFAS-Score und dem Maestro-Morphotyp beobachtet. Es gibt es bisher keine Untersuchungen, welche einen direkten Zusammenhang zwischen einem bestimmten metatarsalen Alignment und einer degenerativen Erkrankung belegen konnten (Fuhrmann et al. 2005). Auch konnte bisher kein Zusammenhang zwischen der Länge eines symptomatischen Strahls bzw. einem nicht harmonischen Metatarsalindex und dem Auftreten einer Transfermetatarsalgie nachgewiesen werden (Bevernage und Leemrijse 2008; Kaipel et al. 2011; Slullitel et al. 2016). Eine Korrektur des Alignments bei fehlender Pathologie, nur um einen radiologisch harmonischen Vorfuß zu erreichen, sollte kritisch hinterfragt werden. Hinzu kommt, dass eine Verkürzungsosteotomie an zuvor stabilen asymptomatischen MTP-Gelenken ein 0,4% höheres Risiko für Transfermetatarsalgien unter den benachbarten Strahlen birgt als bei präoperativ instabilen MTP-Gelenken (Bevernage und Leemrijse 2008). Zudem liegt auch bei gesunden Füßen nur in 31 % der Fälle (Maestro et al. 2003) bzw. 25,3 % (Deleu et al. 2010) ein harmonischer Morphotyp vor. Vorhersagen über das

klinische Outcome lassen sich nicht anhand des Maestro-Morphotypen treffen (Biz et al. 2018). Der harmonische Morphotyp sollte daher als Empfehlung angesehen werden, um übermäßige Kürzungen einzelner Metatarsalia im Vergleich zu Benachbarten zu verhindern. Deleu et al. (2010) sehen die Methode nach Maestro als eine zuverlässige Methode, um die mathematische Progression der kleineren Metatarsalia zu analysieren. Es sollte allerdings nicht Ziel der Operation sein, in jedem Fall einen harmonischen Vorfuß zu erzeugen (Deleu et al. 2010).

### **5.3 Pedobarografisches Outcome**

Ein weiteres Ziel der Studie war es zu prüfen, wie sich die plantare Druckverteilung postoperativ in Abhängigkeit von der gewählten Operationsmethode verändert. Es ließen sich nach beiden Operationen deutliche Veränderungen von prä- zu postoperativ in den pedobarografischen Daten erkennen.

Durch die Weil-Osteotomie konnte eine signifikant verbesserte Lastaufnahme und Kraftübertragung durch den medialen Vorfuß erreicht werden. Hier konnte eine deutliche Zunahme des Kraft-Zeit-Integrals um 2,73 %BWs beobachtet werden. Eine Entlastung des zentralen Vorfußes deutete sich an, wobei dies zurückhaltend interpretiert werden sollte, da diese Veränderungen nicht signifikant waren. Die Entlastung des zentralen Vorfußes führte einerseits zur verstärkten Kraftübertragung über den medialen Vorfuß. Andererseits deutete sich gleichzeitig eine Lastverschiebung zum lateralen Vorfuß hin an. Dies könnte ein Risikofaktor für die Entstehung einer Transfermetatarsalgie sein. Bei Betrachtung der Rate der unerwünschten Ereignisse zeigt sich allerdings keine Zunahme der Transfermetatarsalgien. Es wäre möglich, dass die sich in der Pedobarografie abzeichnende Mehrbelastung des lateralen Vorfußes noch so gering war, dass dies keine klinisch sichtbaren Folgen hatte. Ursächlich für die Lastverschiebung nach lateral könnte die bevorzugt am zweiten Metatarsale durchgeführte Weil-Osteotomie sein. Dabei könnte ein unregelmäßiges Alignment, mit relativer Überlänge von M3, wie bereits unter 5.2 beschrieben, entstanden sein. Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Morphotyp nach Maestro und dem postoperativen Spitzendruck im Bereich des lateralen Vorfußes, was diese Annahme bestätigt. Die Veränderungen im Bereich des zentralen und lateralen Vorfußes sollten vorsichtig interpretiert werden, da sie nicht signifikant waren. Dies kann an der geringen Fallzahl liegen und der Effekt kann bei größeren Patientenzahlen stärker hervortreten. Im Bereich der Kleinzehen wurde nach der Operation eine signifikant verringerte Kraftübertragung beobachtet. Dies konnte auf das Auftreten von floating toes nach der Operation zurückgeführt werden.

In einer pedobarografischen Studie konnten Vandeputte et al. (2000) ebenfalls eine effektive Drucksenkung unter dem Vorfuß durch eine Weil-Osteotomie erzielen. Ähnliche Ergebnisse

berichten auch Khalafi et al. (2005), wonach es durch eine Weil-Osteotomie am zweiten Metatarsale zu einer Reduzierung des Spitzendrucks um 65 % in diesem Bereich kommen kann. Gleichzeitig wurde eine Zunahme des Druckes unter dem ersten Metatarsale beobachtet. Khurana et al. (2011) bestätigen, dass durch die Weil-Osteotomie ein erhöhter Druck unter dem Vorfuß deutlich gesenkt werden kann, sofern ein normales Fußprofil wiederhergestellt wird. Die Entlastung einzelner Metatarsalia nach Weil-Osteotomie deutete sich in dieser Arbeit im Bereich des zentralen Vorfußes an. Es zeigte sich zudem eine deutlich verbesserte Lastaufnahme des medialen Vorfußes, wobei auch eine Verschiebung der Lastaufnahme nach lateral deutlicher erkennbar war, als in bisherigen Studien beschrieben. Dies könnte auf ein erhöhtes Risiko für Transfermetatarsalgien hinweisen.

Ähnlich der Weil-Osteotomie zeigte sich auch nach DMMO eine verbesserte Kraftaufnahme des medialen Vorfußes. Dabei wurde eine signifikante Zunahme des Kraft-Zeit-Integrals um 2,49 %BW<sub>s</sub> verzeichnet. Zudem wurde in der DMMO Gruppe im Gegensatz zur Weil-Osteotomie Gruppe eine Entlastung der lateralen Strahlen sichtbar. Dabei nahm der Spitzendruck unter dem lateralen Vorfuß um 192,28 kPa und das Kraft-Zeit-Integral um 1,95 %BW<sub>s</sub> ab. Im Bereich des Mittelfußes wurde eine Zunahme der Belastung sowohl in Bezug auf den Spitzendruck als auch hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals verzeichnet. Es zeigte sich weiterhin eine postoperativ verringerte Kraftübertragung über die Kleinzehen. Diese wurde ebenfalls durch die relativ hohe Rate an postoperativ aufgetretenen floating toes bedingt.

Damit bestätigt die Arbeit die Ergebnisse von Hamel und Nell (2014). Diese beobachteten nach DMMO eine Umverteilung des Spitzendrucks im Mittelfußbereich mit Entlastung des zentralen Vorfußes im Vergleich zu präoperativen pedobarografischen Aufnahmen.

Krenn et al. (2018) verglichen pedobarografische Untersuchungen gesunder Probanden mit postoperativen Aufnahmen von Patienten nach DMMO. Dabei wurden nach DMMO deutlich verringerte Spitzendrücke im Zehenbereich beobachtet, welche mit dem Auftreten von floating toes assoziiert waren, bei gleichzeitig weiterhin erhöhtem Spitzendruck unter dem lateralen Vorfuß. In dieser Studie hingegen wurde eine deutliche Reduktion des Spitzendrucks in diesem Bereich verzeichnet.

Hinsichtlich des postoperativen Spitzendrucks waren beide Operationen vergleichbar. Bei Betrachtung der absoluten Veränderung des Spitzendrucks wurde ein signifikanter Unterschied im Bereich des lateralen Vorfußes deutlich. Dieser nahm nach DMMO stark ab (um 192,29 kPa), nach Weil-Osteotomie hingegen um 100,65 kPa zu. Der Vergleich des postoperativen Spitzen-

druckes zeigte hier keinen Unterschied, da sich die präoperativen Ausgangswerte stark unterschieden und es somit postoperativ zu einer Angleichung kam. Für alle anderen Bereiche des Fußes waren die absoluten Veränderungen des Spitzendruckes nach beiden Operationen vergleichbar.

Beim Vergleich des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals zeigten sich signifikante Unterschiede in den Bereichen des zentralen und lateralen Vorfußes. Dieses war nach DMMO (CVF: 8,67 %BW<sub>s</sub> bzw. LVF: 12,92 %BW<sub>s</sub>) geringer als nach Weil-Osteotomie (CVF: 10,73 %BW<sub>s</sub> bzw. LVF: 16,1 %BW<sub>s</sub>). Betrachtet man die absolute Veränderung des Kraft-Zeit-Integrals zeigten sich im Gebiet des lateralen Vorfuß nach DMMO eine Reduktion um 1,96 %BW<sub>s</sub>, während nach Weil-Osteotomie eine Zunahme um 0,6 %BW<sub>s</sub> zu vermesssen war. Im Bereich des zentralen Vorfußes war die absolute Veränderung des Kraft-Zeit-Integrals vergleichbar. Da aber in der Gruppe der DMMO bereits präoperativ signifikant niedrigere Werte vorlagen, als in der Gruppe der Weil-Osteotomie ergaben sich bei alleiniger Betrachtung des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals deutliche Unterschiede.

Die pedobarografischen Ergebnisse deuten daraufhin, dass die Weil-Osteotomiegruppe ein höheres Risiko für die Entstehung von Transfermetatarsalgien hatte. Die Osteotomie von MT-II bis -IV bzw. -V in der DMMO-Gruppe scheint sich positiv auf das postoperative Druckprofil auszuwirken und das Risiko zu senken.

Die intensive Literaturrecherche ergab keine Arbeiten zu vergleichenden pedobarografischen Ergebnissen bezüglich DMMO und Weil-Osteotomie.

### **5.3.1 Medialer Vorfuß**

Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener unabhängiger Faktoren auf die Belastung des Vorfußes untersucht. Zur Erklärung des postoperativen Spitzendruckes im Bereich des medialen Vorfußes trugen folgende Faktoren bei: Operationsmethode, Auftreten von floating toes, Prozeduren am ersten Strahl, Gewicht und präoperativer Spitzendruck. Es zeigte sich, dass unter Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Operationsverfahren bestand, wobei der postoperative Spitzendruck unter dem medialen Vorfuß nach DMMO um 230,465 kPa höher war als nach Weil-Osteotomie. Den größten Einfluss auf den postoperativen Spitzendruck hatten allerdings die Prozeduren am ersten Strahl. Nach Korrektur des ersten Strahls betrug der postoperative Spitzendruck im Bereich des medialen Vorfußes 258,514 kPa mehr als ohne Operation des MT-I. Dies könnte ein Hinweis für eine erfolgreiche Druckumverteilung in Richtung des ersten Strahls nach Korrektur einer Deformität sein. Floating toes hatten ebenfalls einen Einfluss auf den postoperativen Spitzendruck, wobei es beim Auftreten von floating toes zu einem signifikant erhöhten postoperativen Spitzendruck



kam. Dabei führte der fehlende Bodenkontakt zur verringerten Lastaufnahme der Kleinzehen, welche in einer Mehrbelastung des Vorfußes resultierte. Das Auftreten von floating toes unterschied sich nicht zwischen den Gruppen. So kam es in der DMMO Gruppe zwar zu einer insgesamt besseren Druckumverteilung, dennoch ist das Auftreten von floating toes ungünstig. Überlegenswert wäre die nachgewiesenen Vorteile der DMMO mit Rekonstruktionen der plantaren Platte, um die Zehen besser im MTP-Gelenk zu zentrieren, zu kombinieren. Hierzu sind weitere Studien erforderlich. Fleischer et al. (2020) konnten bereits zeigen, dass eine Kombination einer Weil-Osteotomie mit einer Rekonstruktion der plantaren Platte im Vergleich zu einer alleinigen Weil-Osteotomie postoperativ mit einer höheren Lebensqualität und geringeren Schmerzen verbunden ist. Durch Kombination einer Weil-Osteotomie mit einer Verlängerung der Extensorsehne konnte die bisher geringste Inzidenz von floating toes (6%) in der Literatur erzielt werden (Gregg et al. 2007).

Das Gewicht erklärte auch einen Teil des postoperativen Spitzendrucks, wobei dieser Anteil relativ gering war. Der wichtigste Einflussfaktor auf die Spitzenbelastung des medialen Vorfußes scheint somit die Osteotomie des ersten Strahls zu sein.

Die Untersuchung des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals im Bereich des medialen Vorfußes unter Berücksichtigung der Faktoren Operationsmethode, Prozeduren am ersten Strahl, präoperativer Ausgangswert, Auftreten von floating toes und postoperativem Intermetatarsalwinkel zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Operationsverfahren. Es offenbarte sich ein signifikanter Einfluss des postoperativen IMA auf das postoperative Kraft-Zeit-Integral. Dabei verschlechterte sich bei größerem Winkel die Lastaufnahme des medialen Vorfußes. Dies bestätigt die Annahme, dass die Stellung des ersten Strahls die Lastübertragung des medialen Vorfußes deutlich beeinflusst und ein Hallux valgus diese verschlechtert.

### **5.3.2 Zentraler Vorfuß**

Im Bereich des zentralen Vorfußes wurden die Faktoren Operationsmethode, Auftreten von floating toes, Prozeduren am ersten Strahl und präoperativer Spitzendruck berücksichtigt. Es bestand kein Unterschied zwischen beiden Operationsmethoden hinsichtlich des postoperativen Spitzendrucks. Neben dem präoperativen Ausgangswert hatte das Vorhandensein von floating toes den größten Einfluss. Dabei resultierten floating toes in einem erhöhten Spitzendruck, wobei ein Signifikanzniveau nicht erreicht wurde. Weiterhin zeigte sich, dass der postoperative Spitzendruck nicht durch einen einzelnen Faktor, sondern lediglich durch die Kombination aller Faktoren erklärbar ist. Durch eine alleinige Korrektur des ersten Strahls oder Osteotomien der kleineren Metatarsalia kann keine hinreichende Veränderung der Spitzenbelastung erzielt werden.

Bei der Untersuchung des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals wurden die Operationsmethode, das Auftreten von floating toes, Prozeduren am ersten Strahl, der präoperative Ausgangswert und der postoperative HVA berücksichtigt. Den größten Einfluss hatte nach dem präoperativen Ausgangswert der postoperative Hallux-valgus-Winkel. Ein größerer HVA resultierte dabei in einer geringeren Belastung des zentralen Vorfußes. Floating toes hatten ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Lastaufnahme, wobei es beim Auftreten von floating toes zu einer deutlichen Mehrbelastung des zentralen Vorfußes kam. Die Lastaufnahme des zentralen Vorfußes scheint somit deutlich von der Stellung der Zehen abzuhängen.

### **5.3.3 Lateraler Vorfuß**

Bei der Untersuchung des postoperativen Spitzendrucks unter dem lateralen Vorfuß wurden die gewählte Operationsmethode, das Vorhandensein von rheumatoider Arthritis, Operationen des ersten Strahls und der präoperative Ausgangswert berücksichtigt. Das Auftreten von floating toes hatte einen zu geringen Einfluss, um im Modell Berücksichtigung zu finden. Es konnte nach Berücksichtigung der Kofaktoren kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Operationsmethoden festgestellt werden. Es zeigte sich nach DMMO tendenziell eine niedrigere Spitzenbelastung des lateralen Vorfußes als nach Weil-Osteotomie, wobei dies aufgrund der fehlenden Signifikanz sehr zurückhaltend interpretiert werden sollte. Dies könnte auf eine Lastverschiebung hin zum lateralen Vorfuß hinweisen, welche nach Weil-Osteotomie, nicht aber nach DMMO auftrat. Ausschlaggebend könnte nicht nur die Operationsmethode, sondern auch die Anzahl der operierten Strahlen sein. Die Weil-Osteotomie wurde hauptsächlich am zweiten und dritten Metatarsale durchgeführt, die DMMO hingegen erfolgte meist an allen kleineren Metatarsalia. Durch die alleinige Korrektur eines Strahls könnte es zu Längenmissverhältnissen kommen, wodurch die Entstehung von Transfermetatarsalgien begünstigt wird (Fadel et al. 2002; Maestro et al. 2003), wohingegen eine Korrektur aller Strahlen möglicherweise in einer gleichmäßigeren Lastverteilung resultiert. Eine Korrektur asymptomatischer Strahlen ist jedoch umstritten (Bevernage und Leemrijse 2008) und Kaipel et al. (2011) konnten keinen Zusammenhang zwischen der Metatarsalenlänge und dem Spitzendruck in einem Areal feststellen. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl der operierten Strahlen und der Spitzenbelastung im Bereich des lateralen Vorfußes konnte nicht bestätigt werden. Ein Zusammenhang der Spitzenbelastung unter dem lateralen Vorfuß und der Stellung des ersten Strahls schien nicht zu bestehen.

Die Betrachtung des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals unter dem lateralen Vorfuß zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen. Als erklärende Faktoren wurden neben der Operation und dem präoperativen Ausgangswert, Prozeduren am ersten Strahl, das

Vorhandensein von rheumatoider Arthritis und der postoperative IMA berücksichtigt. Bei rheumatoider Arthritis trat eine niedrigere Belastung des lateralen Vorfußes auf. Es zeigte sich, dass Patienten mit rheumatoider Arthritis ein verändertes Gangbild aufwiesen mit stärkerer Belastung des Rückfußes, um den Vorfuß zu entlasten. Die beobachtete Lastreduktion unter dem lateralen Vorfuß nach DMMO scheint somit durch das Auftreten von rheumatoider Arthritis mitbedingt zu sein und nicht allein auf die Operation zurückzuführen zu sein. Unter Berücksichtigung des Auftretens rheumatoider Arthritis, welche in der Weil-Gruppe seltener auftrat, war die postoperative Belastung in beiden Gruppen vergleichbar.

Postoperativ konnte in beiden Gruppen eine deutlich verbesserte Kraftaufnahme des ersten Strahls verzeichnet werden. Diese kann hauptsächlich auf die operative Korrektur des ersten Metatarsale zurückgeführt werden. Gleichzeitig zeigte sich eine geringe Entlastung des zentralen Vorfußes. Bei der weiteren Untersuchung stellte sich heraus, dass die Belastung des zentralen Vorfußes hauptsächlich durch den Bodenkontakt der Kleinzehen und bedingt durch die Stellung der Großzehe beeinflusst wurde. Lediglich im Bereich des lateralen Vorfußes unterschieden sich beide Gruppen: nach DMMO kam es zu einer deutlichen Entlastung in diesem Gebiet, wohingegen eine vermehrte Belastung des lateralen Vorfußes nach Weil-Osteotomie auftrat. Dies könnte, wie bereits beschrieben, ein Risikofaktor für die Entstehung einer Transfermetatarsalgie sein. Gleichzeitig wurde insgesamt ein deutlicher Einfluss rheumatoider Arthritis auf den lateralen Vorfuß beobachtet, wobei es bei betroffenen Patienten zu einer verringerten Belastung des lateralen Vorfußes kam.

Nach beiden Operationsverfahren wurde eine deutlich reduzierte Kraftübertragung durch die Kleinzehen registriert. Dies konnte auf die Entstehung von floating toes zurückgeführt werden und war in beiden Gruppen vergleichbar. Insgesamt wurde durch beide Operationsverfahren eine Entlastung der mittleren und lateralen Metatarsalia und damit Behebung der Metatarsalgie erreicht.

Zwischen pedobarografischen Ergebnissen und AOFAS-Score bestand lediglich im Bereich der Großzehe eine schwache negative Korrelation zwischen postoperativem Spitzendruck und postoperativem AOFAS-Score. Vermutlich handelt es sich nicht um einen kausalen Zusammenhang, da es unwahrscheinlich erscheint, dass eine verringerte Belastung des ersten Strahls und damit verbundene Mehrbelastung der lateralen Strahlen, im Sinne einer Transfermetatarsalgie zu einem besseren klinischen Outcome führen sollte. Für den restlichen Fuß konnte kein Zusammenhang zwischen pedobarografischen Parametern und AOFAS-Score bzw. FFI-Score festgestellt werden. Mutmaßlich ist dies auf die geringe Patientenzahl zurückzuführen.

Gutteck et al. (2018) konnten hingegen zeigen, dass eine verstärkte Kraftübertragung über den medialen Vorfuß und eine Entlastung des Mittelfußes in einer deutlichen Verbesserung des AOFAS-Scores resultieren.

#### **5.3.4 Einfluss der Stellung des MT-I**

Im Folgenden soll der Einfluss der Stellung des ersten Strahls auf die plantare Druckverteilung genauer betrachtet werden.

Es zeigte sich, dass es durch einen Hallux valgus zu einer geringeren Kraftübertragung im Bereich des medialen Vorfußes und zentralen Vorfußes sowie zu einer Verschiebung der Lastaufnahme auf die lateralen Strahlen kam, auch wenn der Effekt im Bereich des lateralen Vorfußes nicht sehr ausgeprägt war. Dabei wurde ein negativer Zusammenhang zwischen postoperativem IMA und Kraft-Zeit-Integral im Bereich des medialen Vorfußes beobachtet. Im Bereich des zentralen Vorfußes bestand ein negativer Zusammenhang zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem Hallux-valgus-Winkel. Waldecker (2002) sowie Wen et al. (2012) konnten in pedobarografischen Untersuchungen bei Hallux valgus ebenfalls eine verringerte Belastung der Großzehe bei gleichzeitiger Mehrbelastung des zweiten und dritten Metatarsale bzw. des lateralen Vorfuß zeigen. Zusätzlich wurde eine Mehrbelastung der Ferse und eine reduzierte Bodenkontaktzeit des Vorfußes zur Schmerzreduzierung beobachtet (Wen et al. 2012).

Im Bereich des Mittelfußes bestand ein positiver Zusammenhang zwischen postoperativem Kraft-Zeit-Integral und postoperativem HVA. Die Belastung des Mittelfußes könnte damit begründet werden, dass das erste Metatarsale maßgeblich an der Längswölbung des Fußes beteiligt ist. Eine Fehlstellung des ersten Strahls im Sinne eines Hallux valgus führt zu einer veränderten Stellung des ersten Metatarsale und einer Abflachung des Fußgewölbes. So kann es bei stärker ausgeprägtem Hallux valgus zu einer Mehrbelastung des Mittelfußes kommen.

Durch die Korrektur des Hallux valgus konnte die Kraftübertragung des medialen und zentralen Vorfußes verbessert werden sowie eine Entlastung des lateralen Vorfußes erreicht werden. Ferner führte die Korrektur des Hallux valgus zu einer Entlastung des Mittelfußes. Die Spitzenbelastung wurde nicht durch das Vorhandensein eines Hallux valgus beeinflusst.

Die sagittale Einstellung des ersten Metatarsale beeinflusste die plantare Druckverteilung im Bereich des zentralen Vorfußes. Hier resultierte ein negativerer Elevationswinkel, sprich eine physiologischere Stellung des ersten Metatarsale, in einer verringerten Belastung. Es bestanden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der plantaren Druckverteilung zwischen positiven und negativen Elevationswinkeln im Bereich des medialen und lateralen Vorfuß. Die Dorsiflexion des MT-I beträgt in Gruppe A nur 1,39°. Eventuell käme es bei stärkerer Elevation zu klinisch relevanten Unterschieden. Day et al. (2011) konnten zeigen, dass eine geringe Dorsiflexion keine

klinische Relevanz hat und nicht zu einer erhöhten Rate an Transfermetatarsalgien führt. Im Bereich des Mittelfußes bestand ein Zusammenhang zwischen postoperativem Elevationswinkel und postoperativem Spitzendruck, wobei ein positiverer Elevationswinkel mit einer geringeren Spitzenbelastung assoziiert war.

Insgesamt zeigt sich, dass auch die Stellung des ersten Strahls in der Sagittalebene Einfluss auf die Kraftübertragung im Bereich des Vorfußes hat. Somit bestätigt die Arbeit die Ergebnisse der Arbeit von Gutteck et al. (2018), in der gezeigt wurde, dass die Elevation des ersten Strahls ein Risikofaktor für Metatarsalgien darstellt und daher vermieden werden sollte.

Problematisch an der pedobarografischen Messung kann sich die computerbasierte Erfassung der einzelnen Fußareale gestalten, wobei eine klare Abgrenzung einzelner Regionen mitunter schwerfallen kann. Bei stark deformierten Füßen erfolgte eine manuelle Korrektur der Fußmasken.

Die vorliegende Studie weist einige Limitationen auf. Aufgrund der geringen Fallzahl können keine abschließenden Aussagen getroffen werden. Dennoch können die vorliegenden Resultate als Hinweise betrachtet werden. Weiterhin sollte berücksichtigt werden, dass die Zusammensetzung beider Gruppen nicht komplett identisch war und bei vielen Patienten zusätzliche Operationen notwendig waren. Die Ergebnisse dieser Studie sind als mittelfristig einzuschätzen.

Zukünftig sollte eine multizentrische, randomisierte kontrollierte Studie durchgeführt werden, um höhere Fallzahlen zu erzielen und noch verlässlichere Aussagen treffen zu können. Des Weiteren fehlen langfristige Untersuchungen. Die Langzeitauswirkungen sind bisher nur für die Weil-Osteotomie untersucht (Hofstaetter et al. 2005). Zudem sollten die betrachteten Kriterien vereinheitlicht werden, um eine bessere Vergleichbarkeit einzelner Studien zu gewährleisten. So wird das klinische Outcome mittels visueller Analogskala, AOFAS-Score oder durch verbale Einschätzung des Patienten unterschiedlich beurteilt. Auch bei pedobarografischen Untersuchungen sollte eine einheitliche Einteilung des Fußes zu Grunde gelegt werden. In Bezug auf die DMMO fehlen bislang vergleichende prä- und postoperative pedobarografische Untersuchungen. Zur besseren Therapie der Metatarsalgie sollten zudem weitere Untersuchungen des Entstehungsmechanismus erfolgen, da dieser immer noch unzureichend verstanden und in biomechanischen Untersuchungen belegt ist, gleichzeitig aber einen entscheidenden Anteil an der suffizienten Behandlung der Metatarsalgie hat. Insbesondere der Stabilität des MTP-Gelenkes scheint dabei eine besondere Rolle zuzukommen. Die Vermeidung von floating toes ist essenziell, weshalb in zukünftigen Studien eine Kombination der DMMO mit Rekonstruktionen der plantaren Platte untersucht werden sollte.

## 6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden am Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (DOUW) des Universitätsklinikums Halle (Saale) durchgeführten Studie war der Vergleich des Ein-Jahres-Outcomes einer Vorfußkorrektur zur Behandlung einer chronischen Metatarsalgie mittels DMMO mit dem einer Weil-Osteotomie. Dazu wurden insgesamt 77 Patienten mit chronischer Metatarsalgie untersucht, wobei 41 Patienten (44 Füße) eine DMMO und 36 Patienten (40 Füße) eine Weil-Osteotomie erhielten. Von der Studienteilnahme ausgeschlossen waren dabei Patienten, welche an einer sog. sekundären Metatarsalgie litten. Die abschließende Untersuchung der Patienten erfolgte 12 Monate post operationem.

Durch die DMMO und die Weil-Osteotomie konnte die Metatarsalgie suffizient therapiert werden. Es zeigte sich in beiden Gruppen eine deutliche Verbesserung gegenüber der präoperativen Ausgangssituation. Das postoperative Outcome nach beiden Operationsverfahren erscheint vergleichbar, wobei nach Weil-Osteotomie eine höhere Rate an Wundheilungsstörungen und -infektionen zu verzeichnen war. Die radiologischen Ergebnisse waren in beiden Gruppen vergleichbar, wobei postoperativ in beiden Gruppen nur eine geringe Rate an harmonischen Vorfüßen vorlag. Die bei bestehenden Hallux-valgus-Deformitäten präoperativ erhöhten Intermetatarsal- und Hallux-valgus-Winkel wurden in beiden Gruppen suffizient korrigiert. Die Kürzung symptomatischer Strahlen resultierte nach beiden Verfahren in einer Entlastung derselben. Pedobarografisch zeigte sich in beiden Gruppen postoperativ eine bessere Kraftübertragung des medialen Vorfußes. Lediglich im Bereich des lateralen Vorfußes zeigte sich nach Weil-Osteotomie eine Zunahme des postoperativen Kraft-Zeit-Integrals, wohingegen nach DMMO eine Abnahme beobachtet wurde. Zudem wurde eine in beiden Gruppen vergleichbare deutlich reduzierte Kraftübertragung im Bereich der Kleinzehen beobachtet, welche vermutlich auf das Auftreten von floating toes zurückzuführen ist.

Die Metatarsalgie ist ein komplexes Krankheitsbild, welches auf dem Zusammenwirken vieler Einzelfaktoren beruht. Es zeigt sich, dass es nicht einfach ist die Auswirkungen einzelner Korrekturmaßnahmen auf den Vorfuß vorherzusagen. Im Rahmen der Therapie sollte die Gesamtsituation des Patienten mit einbezogen und entsprechend bei der operativen Korrektur mitberücksichtigt werden. Dazu zählt zum einen die Stellung des ersten Strahls, welche starken Einfluss auf die Belastung des medialen Vorfußes hat und entsprechend korrigiert werden sollte. Zum anderen sollten die Stellung der Kleinzehen und Instabilitäten des MTP-Gelenks Berücksichtigung finden. Eine operative Korrektur von Kleinzehenfehlstellungen kann zu einem besseren Ergebnis beitragen. Insbesondere der Entstehung von floating toes sollte vorgebeugt werden, da diese deutlichen Einfluss auf die Kraftübertragung im Bereich des zentralen Vorfußes

haben und zu einer Mehrbelastung des Vorfußes führen können, welches in der vorliegenden Arbeit demonstriert werden konnte. Des Weiteren haben aber auch patientenseitige Faktoren, wie das Gewicht und eventuelle Nebenerkrankungen Einfluss auf das postoperative Outcome. In diesem Zusammenhang muss auch der Entstehungsmechanismus der Metatarsalgie weiter untersucht und verstanden werden. Eine Kombination mit Verfahren zur Rekonstruktion der plantaren Platte zur Stabilisierung des MTP-Gelenks sollte in weiteren Studien untersucht werden.

Hinsichtlich des radiologisch erreichten Vorfußalignments scheinen die DMMO und die Weil-Osteotomie als gleichwertige Verfahren angesehen werden zu können. Unter Berücksichtigung der pedobarografischen und klinischen Ergebnisse scheint die DMMO mit weniger Komplikationen, wie Wundheilungsstörungen und -infektionen assoziiert zu sein, welches das Verfahren für Risikogruppen, wie Patienten mit peripherer arterieller Verschlusskrankheit oder Diabetes mellitus attraktiv erscheinen lässt. Die pedobarografischen Ergebnisse deuten auf eine deutlich bessere postoperative Druckumverteilung nach DMMO im Vergleich zur Weil-Osteotomie hin. Zusammenfassend bietet die DMMO mehr Vorteile als die Weil-Osteotomie und sollte unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Studie insbesondere bei Patienten mit Risikoprofil bevorzugt werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- Arie, E. K.; Moreira, N. S. A.; Freire, G. S.; Santos, B. S. D. & Yi, L. C. (2015). Study of the metatarsal formula in patient with primary metatarsalgia. *Revista Brasileira de Ortopedia* 50 (4), S. 438–444. <https://doi.org/10.1016/j.rboe.2015.06.018>
- Arnold, H. (2005). Kleinzehendeformitäten. Definition, Pathogenese und operative Korrekturmöglichkeiten. *Der Orthopäde* 34 (8), S. 758–766. <https://doi.org/10.1007/s00132-005-0828-3>
- Bardelli, M.; Turelli, L. & Scocciati, G. (2003). Definition and classification of metatarsalgia. *Foot and Ankle Surgery* 9 (2), S. 79–85. [https://doi.org/10.1016/S1268-7731\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S1268-7731(02)00002-4)
- Barouk, L. S. (1996). Die Metatarsalosteotomie nach Weil zur Behandlung der Metatarsalgie. *Der Orthopäde* 25 (4), S. 338–344. <https://doi.org/10.1007/s001320050034>
- Bauer, T. (2014). Percutaneous forefoot surgery. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 100 (1), S. 191–204. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2013.06.017>
- Beech, I.; Rees, S. & Tagoe, M. (2005). A retrospective review of the Weil metatarsal osteotomy for lesser metatarsal deformities: an intermediate follow-up analysis. *The Journal of foot and ankle surgery* 44 (5), S. 358–364. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2005.07.002>
- Besse, J. L. (2017). Metatarsalgia. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 103 (1), S. 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2016.06.020>
- Bevernage, B. D. & Leemrijse, T. (2008). Predictive value of radiographic measurements compared to clinical examination in the preoperative planning for a Weil osteotomy. *Foot & Ankle International* 29 (2), S. 142–149. <https://doi.org/10.3113/FAI.2008.0142>
- Biz, C.; Corradin, M.; Kuete Kanah, W. T.; Dalmau-Pastor, M.; Zornetta, A.; Volpin, A. & Ruggieri, P. (2018). Medium-long-term clinical and radiographic outcomes of minimally invasive distal metatarsal metaphyseal osteotomy (DMMO) for central primary metatarsalgia: Do Maestro criteria have a predictive value in the preoperative planning for this percutaneous technique? *BioMed Research International* 2018, S. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/1947024>
- Borggreve, J. (1949). Zur operativen Behandlung des kontrakten Spreizfusses. *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* 78, S. 581–582.
- Botezatu, I.; Marinescu, R. & Laptou D (2015). Minimally invasive–percutaneous surgery – recent developments of the foot surgery techniques. *Journal of Medicine and Life* 8 (Spec issue), S. 87–93.
- Budiman-Mak, E.; Conrad, K. J. & Roach, K. E. (1991). The Foot Function Index: a measure of foot pain and disability. *Journal of Clinical Epidemiology* 44 (6), S. 561–570. [https://doi.org/10.1016/0895-4356\(91\)90220-4](https://doi.org/10.1016/0895-4356(91)90220-4)
- Coillard, J. Y.; Laffenetre, O.; Cermolacce, C.; Determe, P.; Guillo, S.; Lavigne, C. de & Golano, P. (2010). Percutaneous treatment of static metatarsalgia with distal metatarsal minimally invasive osteotomy. In N. Mafulli & M. Easley (Hrsg.), *Minimally Invasive Forefoot Surgery in Clinical Practice* (S.163-169). Springer.
- Coughlin, M. J. & Jones, C. P. (2007). Hallux valgus: demographics, etiology, and radiographic assessment. *Foot & Ankle International* 28 (7), S. 759–777. <https://doi.org/10.3113/FAI.2007.0759>



- Day, T.; Charlton, T. P. & Thordarson, D. B. (2011). First metatarsal length change after basilar closing wedge osteotomy for hallux valgus. *Foot & Ankle International* 32 (5), 513-518. <https://doi.org/10.3113/FAI.2011.0513>
- Deleu, P. A.; Pod, H.; Leemrijse, T.; Birch, I.; Vande Berg, B. & Bevernage, B. D. (2010). Reliability of the Maestro radiographic measuring tool. *Foot & Ankle International* 31 (10), S. 884–891. <https://doi.org/10.3113/FAI.2010.0884>
- Dohle, J. (2012). Klinische Untersuchung. In D. Sabo (Hrsg.), *Vorfußchirurgie* (2. Aufl., S.21-28). Springer-Verlag.
- Dohle, J. (2015). Metatarsalgie. In S. Rammelt (Hrsg.), *Fuß- und Sprunggelenkchirurgie: Das Kursbuch* (S. 124–137). Schattauer Verlag.
- Dohle, J. (2017). Metatarsalgie. In C. Stukenborg-Colsman & R. A. Fuhrmann (Hrsg.), *Kurzgefasste Fußchirurgie* (S. 88–95). Georg Thieme.
- Dreeben, S. M.; Noble, P. C.; Hammerman, S.; Bishop, J. O. & Tullos, H. S. (1989). Metatarsal osteotomy for primary metatarsalgia: radiographic and pedobarographic study. *Foot & Ankle International* 9 (5), S. 214–218. <https://doi.org/10.1177/107110078900900502>
- DuVries, H. L. (1965). *Surgery of the foot* (2. Aufl.). The C.V. Mosby Company.
- Espinosa, N.; Maceira, E. & Myerson, M. S. (2008). Current concept review: metatarsalgia. *Foot & Ankle International* 29 (8), S. 871–879. <https://doi.org/10.3113/FAI.2008.0000>
- Fadel, G. E. & Rowley, D. I. (2002). (iv) Metatarsalgia. *Current Orthopaedics* 16 (3), S. 193–204. <https://doi.org/10.1054/cuor.2002.0269>
- Fleischer, A. E.; Klein, E. E.; Bowen, M.; McConn, T. P.; Sorensen, M. D. & Weil, L. (2020). Comparison of combination Weil metatarsal osteotomy and direct plantar plate repair versus Weil metatarsal osteotomy alone for forefoot metatarsalgia. *The Journal of foot and ankle surgery* 59 (2), S. 303–306. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2019.08.023>
- Fuhrmann, R. A. (2012). Weil-Osteotomie. In D. Sabo (Hrsg.), *Vorfußchirurgie* (2. Aufl., S. 99–101). Springer-Verlag.
- Fuhrmann, R. A.; Roth, A. & Venbrocks, R. A. (2005). Metatarsalgie. Differenzialdiagnose und Therapie. *Der Orthopäde* 34 (8), S.767-775. <https://doi.org/10.1007/s00132-005-0831-8>
- García-Rey, E.; Cano, J.; Guerra, P. & Sanz-Hospital, F. J. (2004). The Weil osteotomy for median metatarsalgia. A short-term study. *Foot and Ankle Surgery* 10 (4), S. 177–180. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2004.07.002>
- Garg, R.; Thordarson, D. B.; Schrupf, M. & Castaneda, D. (2008). Sliding oblique versus segmental resection osteotomies for lesser metatarsophalangeal joint pathology. *Foot & Ankle International* 29 (10), S. 1009–1014. <https://doi.org/10.3113/FAI.2008.1009>
- Geng, X.; Huang, D.; Wang, X.; Zhang, C.; Huang, J.; Ma, X.; Chen, L.; Wang, C.; Yang, J. & Wang, H. (2017). Loading pattern of postoperative hallux valgus feet with and without transfer metatarsalgia: a case control study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 12 (1), S. 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13018-017-0622-z>
- Gibbard, K. W. & Kilmartin, T. E. (2003). The Weil osteotomy for the treatment of painful plantar keratoses. *The Foot* 13 (4), S. 199–203. [https://doi.org/10.1016/S0958-2592\(03\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0958-2592(03)00061-0)
- Gregg, J.; Silberstein, M.; Clark, C. & Schneider, T. (2007). Plantar plate repair and Weil osteotomy for metatarsophalangeal joint instability. *Foot and Ankle Surgery* 13 (3), S. 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2007.01.001>

- Gutteck, N.; Savov, P.; Panian, M.; Wohlrab, D.; Zeh, A. & Delank, K. S. (2018). Preliminary results of a plantar plate for Lapidus arthrodesis. *Foot and Ankle Surgery* 24 (5), S. 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2017.04.009>
- Gutteck, N.; Schilde, S. & Delank, K. S. (2019). Pain on the plantar surface of the foot. *Deutsches Ärzteblatt International* 116 (6), S. 83–88. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0083>
- Hamel, J. & Nell, M. (2014). Minimalinvasiv durchgeführte distale Metatarsale-Schrägosteotomie zur Behandlung der Metatarsalgie. *OUP* (3), S. 118–122. <https://doi.org/10.3238/oup.2014.0118-0122>
- Haque, S.; Kakwani, R.; Chadwick, C.; Davies, M. B. & Blundell, C. M. (2016): Outcome of minimally invasive distal metatarsal metaphyseal osteotomy (DMMO) for lesser toe metatarsalgia. *Foot & Ankle International* 37 (1), S. 58–63. <https://doi.org/10.1177/1071100715598601>
- Helal, B. (1975). Metatarsal osteotomy for metatarsalgia. *The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume* 57-B (2), S. 187–192. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.57B2.187>
- Henry, J.; Besse, J. L. & Fessy, M. H. (2011). Distal osteotomy of the lateral metatarsals: a series of 72 cases comparing the Weil osteotomy and the DMMO percutaneous osteotomy. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 97 (6), S.57-65. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2011.07.003>
- Highlander, P.; VonHerbulis, E.; Gonzalez, A.; Britt, J. & Buchman, J. (2011). Complications of the Weil osteotomy. *Foot & ankle Specialist* 4 (3), S. 165–170. <https://doi.org/10.1177/1938640011402822>
- Hofstaetter, S. G.; Hofstaetter, J. G.; Petroutsas, J. A.; Gruber, F.; Ritschl, P. & Trnka, H.-J. (2005). The Weil osteotomy: a seven-year follow up. *The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume* 87-B (11), S. 1507–1511. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5456-2.50017-2>
- Holmes, G. B. & Timmerman, L. (1990). A quantitative assessment of the effect of metatarsal pads on plantar pressures. *Foot & Ankle* 11 (3), S. 141–145. <https://doi.org/10.1177/107110079001100304>
- Ibrahim, T.; Beiri, A.; Azzabi, M.; Best, A. J.; Taylor, G. J. & Menon, D. K. (2007). Reliability and validity of the subjective component of the American Orthopaedic Foot and Ankle Society clinical rating scales. *The Journal of foot and ankle surgery* 46 (2), S. 65–74. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2006.12.002>
- Jarde, O.; Hussenot, D.; Vimont, E.; Barouk, L. S.; Ferre, B. & Raad, G. A. (2001). Weil's cervicocapital osteotomy for median metatarsalgia. Report of 70 cases. *Acta Orthopaedica Belgica* 67 (2), S. 139–148.
- Johansen, J. K.; Jordan, M. & Thomas, M. (2019). Clinical and radiological outcomes after Weil osteotomy compared to distal metatarsal metaphyseal osteotomy in the treatment of metatarsalgia - a prospective study. *Foot and Ankle Surgery* 25 (4), S. 488–494. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2018.03.002>
- Jung, H. G.; Zaret, D. I.; Parks, B. G. & Schon, L. C. (2005). Effect of first metatarsal shortening and dorsiflexion osteotomies on forefoot plantar pressure in a cadaver model. *Foot & Ankle International* 26 (9), S. 748–753. <https://doi.org/10.1177/107110070502600913>
- Kaipel, M.; Krapf, D. & Wyss, C. (2011). Metatarsal length does not correlate with maximal peak pressure and maximal force. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 469 (4), S. 1161–1166. <https://doi.org/10.1007/s11999-010-1615-y>

- Khalafi, A.; Landsman, A. S.; Lautenschlager, E. P. & Kelikian, A. S. (2005). Plantar forefoot pressure changes after second metatarsal neck osteotomy. *Foot & Ankle International* 26 (7), S. 550–555. <https://doi.org/10.1177/107110070502600710>
- Khurana, A.; Kadamabande, S.; James, S.; Tanaka, H. & Hariharan, K. (2011). Weil osteotomy: assessment of medium term results and predictive factors in recurrent metatarsalgia. *Foot and Ankle Surgery* 17 (3), S. 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2010.04.003>
- Kitaoka, H. B.; Alexander, I. J.; Adelaar, R. S.; Nunley, J. A.; Myerson, M. S. & Sanders, M. (1994). Clinical rating systems for the ankle-hindfoot, midfoot, hallux, and lesser toes. *Foot & Ankle International* 15 (7), S. 349–353. <https://doi.org/10.1177/107110079401500701>
- Klos, K.; Wilde, C. H.; Lange, A.; Wagner, A.; Gras, F.; Skulev, H. K.; Mückley, T. & Simons, P. (2013). Modified Lapidus arthrodesis with plantar plate and compression screw for treatment of hallux valgus with hypermobility of the first ray: a preliminary report. *Foot and Ankle Surgery* 19 (4), S. 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2013.06.003>
- Kramer, W. C.; Parman, M. & Marks, R. M. (2015). Hammertoe correction with k-wire fixation. In: *Foot & Ankle International* 36 (5), S. 494–502. <https://doi.org/10.1177/1071100714568013>
- Krenn, S.; Albers, S.; Bock, P.; Mansfield, C.; Chraim, M. & Trnka, H. J. (2018). Minimally invasive distal metatarsal metaphyseal osteotomy of the lesser toes: learning curve. *Foot & ankle Specialist* 11 (3), S. 263–268. <https://doi.org/10.1177/1938640017750251>
- Maestro, M.; Besse, J. L.; Ragusa, M. & Berthonnaud, E. (2003). Forefoot morphotype study and planning method for forefoot osteotomy. *Foot and ankle Clinics* 8 (4), S. 695–710. [https://doi.org/10.1016/S1083-7515\(03\)00148-7](https://doi.org/10.1016/S1083-7515(03)00148-7)
- Mau, C. (1940). Eine Operation des kontrakten Spreizfusses. *Zentralblatt für Chirurgie: Zeitschrift für allgemeine, viszeral- und Gefäßchirurgie* 67, S. 667–670.
- Mehlhorn, A. T.; Harrasser, N. & Walther, M. (2020). Behandlung von plantaren, neuropathischen und metatarsalen Ulzera mittels distaler minimalinvasiver metatarsaler Osteotomie. *Der Orthopäde* 49 (7), S. 625–631. <https://doi.org/10.1007/s00132-019-03848-w>
- Meisenbach, R. O. (1916). Painful anterior arch of the foot: an operation for its relief by means of raising the arch. *The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume* 2 (4), S. 206–211.
- Melamed, E. A.; Schon, L. C.; Myerson, M. S. & Parks, B. G. (2002). Two modifications of the Weil osteotomy: analysis on sawbone models. *Foot & Ankle International* 23 (5), S. 400–405. <https://doi.org/10.1177/107110070202300505>
- Migues, A.; Slullitel, G.; Bilbao, F.; Carrasco, M. & Solari, G. (2004). Floating-toe deformity as a complication of the Weil osteotomy. *Foot & Ankle International* 25 (9), S. 609–613. <https://doi.org/10.1177/107110070402500902>
- Nakagawa, S.; Fukushi, J.-I.; Nakagawa, T.; Mizu-Uchi, H. & Iwamoto, Y. (2016). Association of metatarsalgia after hallux valgus correction with relative first metatarsal length. *Foot & Ankle International* 37 (6), S. 582–588. <https://doi.org/10.1177/1071100716634792>
- Nilsson, H. (1930). Hallux rigidus and its treatment. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 1 (1-4), S. 295–303. <https://doi.org/10.3109/17453673008991145>
- Obrador, C.; Losa-Iglesias, M.; Becerro-de-Bengoa-Vallejo, R. & Kabbash, C. A. (2018). Comparative study of intramedullary hammertoe fixation. *Foot & Ankle International* 39 (4), S. 415–425. <https://doi.org/10.1177/1071100717745854>

- O’Kane, C. & Kilmartin, T. E. (2002). The surgical management of central metatarsalgia. *Foot & Ankle International* 23 (5), S. 415–419. <https://doi.org/10.1177/107110070202300508>
- Perez, H. R.; Reber, L. K. & Christensen, J. C. (2008). The role of passive plantar flexion in floating toes following Weil osteotomy. *The Journal of foot and ankle surgery* 47 (6), S. 520–526. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2008.08.005>
- Pérez-Muñoz, I.; Escobar-Antón, D. & Sanz-Gómez, T. A. (2012). The role of Weil and triple Weil osteotomies in the treatment of propulsive metatarsalgia. *Foot & Ankle International* 33 (6), S. 501–506. <https://doi.org/10.3113/FAI.2012.0501>
- Prado, M. de; Cuervas-Mons, M.; Golanó, P. & Vaquero, J. (2016). Distal metatarsal minimal invasive osteotomy (DMMO) for the treatment of metatarsalgia. *Techniques in Foot & Ankle Surgery* 15 (1), S. 12–18. <https://doi.org/10.1097/BTF.0000000000000093>
- Redfern, D.; Vernois, J. & Legre, B. P. (2015). Percutaneous surgery of the forefoot. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery* 32 (3), S. 291–332. <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2015.03.007>
- Redfern, D. J. & Vernois, J. (2016): Percutaneous surgery for metatarsalgia and the lesser toes. In: *Foot and ankle Clinics* 21 (3), S. 527–550. DOI: 10.1016/j.fcl.2016.04.003
- Richman, S. H.; Siqueira, M. B. P.; McCullough, K. A. & Berkowitz, M. J. (2017). Correction of hammertoe deformity with novel intramedullary PIP fusion device versus K-wire fixation. *Foot & Ankle International* 38 (2), S. 174–180. <https://doi.org/10.1177/1071100716671883>
- Riskowski, J. L.; Hagedorn, T. J. & Hannan, M. T. (2011). Measures of foot function, foot health, and foot pain. *Arthritis care & research* 63 (0 11), 229–239. <https://doi.org/10.1002/acr.20554>
- Rivero-Santana, A.; Perestelo-Pérez, L.; Garcés, G.; Álvarez-Pérez, Y.; Escobar, A. & Serrano-Aguilar, P. (2019). Clinical effectiveness and safety of Weil’s osteotomy and distal metatarsal mini-invasive osteotomy (DMMO) in the treatment of metatarsalgia: a systematic review. *Foot and Ankle Surgery* 25 (5), S. 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2018.06.004>
- Schievink, F. (2017). Orthopädieschuhtechnische Versorgung mit Einlagen und orthopädischen Schuhzurichtungen. *Fuß & Sprunggelenk* 15 (4), S. 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.fuspru.2017.10.001>
- Schuh, R. & Trnka, H. J. (2011). Metatarsalgia: distal metatarsal osteotomies. *Foot and ankle Clinics* 16 (4), S. 583–595. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2011.08.009>
- Slullitel, G.; Lopez, V.; Calvi, J. P.; Seletti, M.; Bartolucci, C. & Pinton, G. (2016). Effect of first ray insufficiency and metatarsal index on metatarsalgia in hallux valgus. *Foot & Ankle International* 37 (3), S. 300–306. <https://doi.org/10.1177/1071100715615323>
- SooHoo, N. F.; Samimi, D. B.; Vyas, R. M. & Botzler, T. (2006). Evaluation of the validity of the Foot Function Index in measuring outcomes in patients with foot and ankle disorders. *Foot & Ankle International* 27 (1), S. 38–42. <https://doi.org/10.1177/107110070602700107>
- SooHoo, N. F.; Shuler, M. & Fleming, L. L. (2003). Evaluation of the validity of the AOFAS Clinical Rating Systems by correlation to the SF-36. *Foot & Ankle International* 24 (1), S. 50–55. <https://doi.org/10.1177/107110070302400108>
- Thordarson, D.; Ebramzadeh, E.; Moorthy, M.; Lee, J. & Rudicel, S. (2005). Correlation of hallux valgus surgical outcome with AOFAS forefoot score and radiological parameters. *Foot & Ankle International* 26 (2), S. 122–127. <https://doi.org/10.1177/107110070502600202>

- Trnka, H. J.; Gebhard, C.; Mühlbauer, M.; Ivanic, G. & Ritschl, P. (2002). The Weil osteotomy for treatment of dislocated lesser metatarsophalangeal joints: good outcome in 21 patients with 42 osteotomies. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 73 (2), S. 190–194. <https://doi.org/10.1080/000164702753671795>
- Trnka, H. J.; Mühlbauer, M.; Zettl, R.; Myerson, M. S. & Ritschl, P. (1999). Comparison of the results of the Weil and Helal osteotomies for the treatment of metatarsalgia secondary to dislocation of the lesser metatarsophalangeal joints. *Foot & Ankle International* 20 (2), S. 72–79. <https://doi.org/10.1177/107110079902000202>
- Trnka, H. J.; Nyska, M.; Parks, B. G. & Myerson, M. S. (2001). Dorsiflexion contracture after the Weil osteotomy: results of cadaver study and three-dimensional analysis. *Foot & Ankle International* 22 (1), S. 47–50. <https://doi.org/10.1177/107110070102200107>
- Vandeputte, G.; Dereymaker, G.; Steenwerckx, A. & Peeraer, L. (2000). The weil osteotomy of the lesser metatarsals: a clinical and pedobarographic follow-up study. *Foot & Ankle International* 21 (5), S. 370–374. <https://doi.org/10.1177/107110070002100502>
- Waldecker, U. (2002). Metatarsalgia in hallux valgus deformity: a pedographic analysis. *The Journal of foot and ankle surgery* 41 (5), S. 300–308. [https://doi.org/10.1016/S1067-2516\(02\)80048-5](https://doi.org/10.1016/S1067-2516(02)80048-5)
- Wei, R. X.; Ling, S. K.; Lui, T. H. & Yung, P. S. (2020). Ideal implant choice for proximal interphalangeal joint arthrodesis in hammer toe/claw toe deformity correction: A systematic review. *Journal of Orthopaedic Surgery* 28 (1), 1-9. <https://doi.org/10.1177/2309499020911168>
- Wen, J.; Ding, Q.; Yu, Z.; Sun, W.; Wang, Q. & Wei, K. (2012). Adaptive changes of foot pressure in hallux valgus patients. *Gait & posture* 36 (3), S. 344–349. <https://doi.org/10.1016/j.gait-post.2012.03.030>
- Yeo, N. E. M.; Loh, B.; Chen, J. Y.; Yew, A. K. S. & Ng, S. Y. (2016). Comparison of early outcome of Weil osteotomy and distal metatarsal mini-invasive osteotomy for lesser toe metatarsalgia. *Journal of Orthopaedic Surgery* 24 (3), S. 350–353. <https://doi.org/10.1177/1602400315>
- Zirm, R. J. (2012). The Weil lesser metatarsal osteotomy. In L. V. Rabjohn, J. Southerland, M. Downey, J. Boberg, A. Nakra, D. Alder & The Podiatry Institute (Hrsg.), *McGlamrys's comprehensive textbook of foot and ankle surgery* (4. Aufl.). Lippincott Williams & Wilkins.

## 8 Thesen

1. Die DMMO ist der Weil-Osteotomie aufgrund des geringeren Risikos für Wundheilungsstörungen und Infektionen überlegen.
2. Die DMMO sollte bei Risikopatienten mit z.B. Diabetes und Durchblutungsstörungen bevorzugt angewendet werden.
3. Floating toes sind eine häufige Komplikation und ein wichtiger Risikofaktor für das Wiederauftreten einer Metatarsalgie
4. Anhand des radiologischen Vorfußalignments kann keine Vorhersage über das klinische Outcome getroffen werden.
5. Die DMMO sollte aufgrund einer physiologischeren Druckumverteilung und geringerem Transfermetatarsalgierisiko gegenüber der Weil-Osteotomie bevorzugt werden.

## Anhang

### Anhang 1: Fragebogen zur Erhebung des Foot Function Index

#### Schmerzskala

Die Skala neben jedem Punkt stellt das **Ausmaß an Fußschmerzen**, die Sie üblicherweise in jeder der beschriebenen Situationen hatten. Ganz links ist „keine Schmerzen“ und ganz rechts „schlimmste Schmerzen“. Markieren Sie auf der Skala, wie schlimm Ihre Fußschmerzen in jeder der folgenden Situationen **während der letzten Woche** waren. Wenn eine oder mehrere Aussagen für Sie nicht zutreffend waren, markieren Sie rechts neben der Skala „NZ“ (nicht zutreffend).

#### Wie stark waren Ihre Fußschmerzen...

##### 1. ...im schlimmsten Fall?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 2. ...bevor Sie am Morgen aufstanden?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 3. ...beim barfuß Gehen?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 4. ...beim barfuß Stehen?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 5. ...beim Gehen mit Schuhen?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 6. ...beim Stehen mit Schuhen?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 7. ...am Ende des Tages?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

##### 8. ...in der Nacht?

Keine Schmerzen 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 schlimmste Schmerzen  „NZ“

### Funktionsskala

Die Skala neben jedem Punkt stellt das **Ausmaß an Schwierigkeiten** dar, die Sie wegen Ihrem Fuß hatten, während Sie eine Aktivität ausübten. Ganz links ist „keine Schwierigkeiten“ und ganz rechts ist „unmöglich zu tun“. Markieren Sie auf der Skala, wie groß Ihre Schwierigkeiten waren jede der Aktivitäten **während der letzten Woche** auszuüben. Wenn Sie eine Aktivität in der letzten Woche nicht ausgeübt haben, markieren Sie rechts neben der Skala „NZ“ (nicht zutreffend)

#### Wie groß waren wegen Ihrem Fuß Ihre Schwierigkeiten...

**1. ...im Haus zu gehen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**2. ...auf unebenem Boden zu gehen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**3. ...1 km oder mehr zu gehen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**4. ...Treppen hinauf zu steigen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**5. ...Treppen hinunter zu steigen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**6. ...auf den Zehenspitzen zu stehen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**7. ...aus einem Stuhl aufzustehen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**8. ...schnell zu gehen oder zu rennen?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**9. ...Freizeitaktivitäten oder Sport auszuüben?**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

**10. ...bestimmte Schuhe zu tragen? (z.B. hohe Schuhe, Sandalen, usw.)**

Keine Schwierigkeiten 

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 unmöglich zu tun  „NZ“

Quelle: in Anlehnung an Budiman-Mak et al. 1991



## **Erklärungen**

(1) Ich erkläre, dass ich mich an keiner anderen Hochschule einem Promotionsverfahren unterzogen bzw. eine Promotion begonnen habe.

(2) Ich erkläre, die Angaben wahrheitsgemäß gemacht und die wissenschaftliche Arbeit an keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht zu haben.

(3) Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Alle Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis wurden eingehalten; es wurden keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.

## **Danksagung**

Ich möchte mich hiermit bei Herrn Prof. Dr. med. Karl-Stefan Delank, Leiter des Departments für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie der Universität Halle, bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit unter seiner Leitung durchzuführen.

Frau apl. Prof. Dr. med. Natalia Gutteck danke ich besonders für die Themastellung, die hervorragende Betreuung und ihre ständige Diskussions- und Hilfsbereitschaft. Auch für die mühevollen Arbeit des Korrekturlesens möchte ich mich herzlich bedanken.

Besonderen Dank auch an Herrn Matti Panian für die Durchführung der pedobarografischen Messungen und seine stete Hilfsbereitschaft, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei meinen Eltern und Geschwistern möchte ich mich ganz besonders herzlich bedanken für die uneingeschränkte, liebevolle und vielseitige Unterstützung während meines Studiums, ohne die diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre.